

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

СБОРКА

В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ



ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

11 2015
(184)

СОДЕРЖАНИЕ

Экономика и организация сборочного производства

Дроботов А.В., Авдеев А.Р., Швец А.А. Анализ способов повышения производительности устройств объемной печати при изготовлении сборочных изделий 3

Современные технологии сборки

Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Тимофеев М.В. Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей 7

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка режущего инструмента 12

Разборка. Ремонт

Рыкунов А.Н., Котельников В.И. Сборка механизмов из восстановленных при ремонте деталей 34

В помощь конструктору, технологу

Аввакумов В.Д. Особенность расчета плоских размерных цепей 37
Медведев А.М., Сокольский А.М. Технологическое обеспечение надежности электрической изоляции электронных сборок авионики 41

Соединение деталей машин

Безъязычный В.Ф., Федулов В.М. Определение давления в прессовых соединениях с учетом материала контактируемых поверхностей деталей и условий их обработки 45

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — 79748, Объединенному каталогу "Пресса России" — 84967, каталогу "Почта России" — 60257) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель
редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ
(главный редактор), д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.

А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф.
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.
Г.А. ЯРКОВ, инж.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРИНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н.,

чл.-кор. РАН

А.А. СУПОНИЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.

В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.

В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.

Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОННА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.

А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.

Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.

Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНBURГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.

А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

О.Г. КРАСИЛЬНИКОВА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ
по делам печати, телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ
№ 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

11 2015
(184)

CONTENTS

Economy and the organization of assembly

- Drobotov A.V., Avdeev A.R., Shvets A.A. Analysis of 3D-printing performance increase methods during assembly products manufacturing 3

Modern technologies in assembly

- Nepomiluev V.V., Oleynikova E.V., Timofeev M.V. The improving of stability of the assembly process on the basis of individual component selection 7

Assembly welding works. Soldering

- Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering of toolpiece 12

The dismantling. Repair

- Rykunov A.N., Kotelnikov V.I. Assembling mechanisms of repaired parts 34

Industrial and design engineer's aid

- Avvakumov V.D. The feature of calculation of flat dimensional chains 37
Medvedev A.M., Sokolskiy A.M. Technological support electrical insulation reliability of electronic assemblies avionics 41

Connection of machines parts

- Bezjazychnyi V.F., Fedulov V.M. Detecting the pressure in the press connection taking into account of the material contacted surfaces of the parts and conditions processing 45

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" — 84967, the catalogue "Pochta Rossii" — 60257) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.

<http://www.mashin.ru> E-mail: sborka@machin.ru

The reference to the *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making* Journal during reprint of the materials is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science

F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)	A.I. KUMENKO
M.V. VARTANOV	A.V. MEDAR'
A.A. GUSEV	E.A. MIKRIN
I.N. ZININA	V.V. POROSHIN
Yu.L. IVANOV	B.V. SHANDROV
Yu.G. KOZYREV	A.A. SHATILOV
	A.G. KHOLODKOVA
	G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD

N.A. PELIPENKO	A.I. SERDUK
	A.P. FOT

BIANSK

O.A. GORLENKO	V.F. BEZIAZYSHNY
	V.V. NEPOMILUEV

VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN	A.N. SEMENOV
A.A. SUPONIA	

VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL	M.A. EVDOKIMOV
V.G. KARABAN'	Yu.A. VASHUKOV
V.I. LYSAK	V.A. NIKOLAEV

IZHEVSK

V.M. TRUKHANOV	ST.-PETERSBURG
	V.F. KUZMIN

KAZAN

R.I. ADGAMOV	E.V. SHALOBAEV
KOVROV	

YU.Z. ZHITNIKOV

YU.D. AMIROV	SEVASTOPOL
KOLOMNA	E.L. PERVUKHINA

KAZAN

R.I. ADGAMOV	TOLIATI
KOVROV	A.I. RYZHKOV

YU.Z. ZHITNIKOV

YU.D. AMIROV	TULA
KOLOMNA	A.I. PREYS

KAZAN

R.I. ADGAMOV	KHABAROVSK
KOVROV	V.A. LASHKO

YU.D. AMIROV

YU.D. AMIROV	V.I. SCHPORT
KOLOMNA	Belarus

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN	MINSK
A.M. SHPILEV	V.L. BASINJUK

NABEREZHNYE CHELNY

S.V. DMITRIEV	M.L. KHEIFETZ
R.M. KHISAMUTDINOV	GOMEL

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV	Ukraine
OMSK	KIEV

V.N. KOSTIUKOV

YU.S. STEPANOV	A.S. ZENKIN
G.A. KHARLAMOV	V.A. MATVIENKO

OREL

YU.S. STEPANOV	Donetsk
G.A. KHARLAMOV	A.N. MIKHAILOV

A.N. POLYAKOV

A.N. POLYAKOV	Poland
	P. LEBKOVSKI

Executive editors

of current issue:

O.G. KRASILNIKOVA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate IE . 77-1747, February 25, 2000

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 62-192: 658.5.012.1

А.В. Дроботов, канд. техн. наук, А.Р. Авдеев, А.А. Швец
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: alexey.drobotov@gmail.com

Анализ способов повышения производительности устройств объемной печати при изготовлении сборочных изделий

Предложена методика анализа производительности наиболее распространенных устройств для объемной печати. Для этого выбрана характерная деталь, имеющая сложную форму. Для каждой технологии печати оценена длительность операций, входящих в технологический процесс, получены выражения для оценки производительности в зависимости от технических характеристик устройств.

The methodology of performance analysis for the most spread devices for 3D-printing is proposed. Typical detail with complex form for 3D-printing is defined for this purpose. For each printing technology the duration of operations of its technological process was estimated, expressions for productivity assessment were suggested.

Ключевые слова: технологии объемной печати, проектирование многоузлового изделия, характерная деталь, производительность объемной печати.

Keywords: 3D-printing technology, design multisite product, characteristic detail, the performance of 3D-printing.

Одним из этапов проектирования изделия является проверка его собираемости, которую удобно проводить на макете изделия. Использование технологий объемной печати позволяет быстрее получить такой макет [1–5]. Однако производительность современных устройств невелика: например, изготовление одной детали объемом $V_{\text{дет}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ занимает в среднем 15 ч.

Для распространенных технологий объемной печати можно выделить несколько способов повышения производительности.

В таблице приведена производительность P известных устройств объемной печати. Их

принято разделять на классы [6], соответствующие сфере использования.

На производительность P печати влияют скорость v нанесения слоя, объем $V_{\text{дет}}$ изготавливаемой детали, толщина T наносимого слоя, вспомогательное время t_b , которое частично зависит от сложности формы изготавливаемой детали.

Производительность P процесса объемной печати можно описать выражением

$$P = \frac{V_{\text{дет}}}{t_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{общ}}$ — общее время печати.

Сравнение производительности устройств объемной печати [3, 6]

Сфера	Технология процесса печати	Название	Производительность, $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-9}$
Личное использование	FDM	RepRap Mendel	4,17
		UP! Mini	0,70
		LulzBot TAZ 3.0	7,50
		3D Systems Cube X	0,75
		MakerBot Replicator 2X	4,00
Профессиональное использование	FDM	Leapfrof Creatr Xeed	3,00
		StratasysObjet30 Pro	3,00
	SLS	3D Systems ProJet 660Pro	7,83
Промышленное производство	SLS	FSL3D Pegasus Touch	6,17
		OWL Nano	7,00
		BeAm VI LF4000	1,17
		3D Systems PROX 500	5,50
	SLS	Arcam A2XX	22,2
		3D Systems PROX 300	13,8
		EOS M 400	5,50

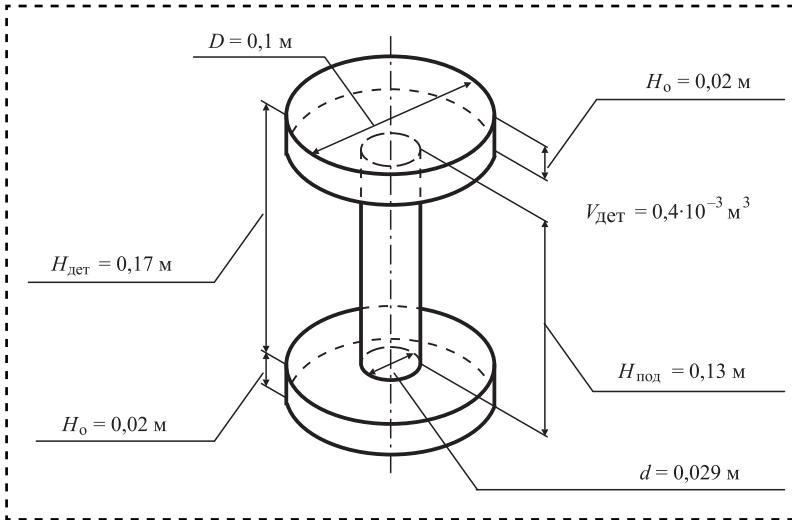


Рис. 1. Деталь, имеющая сложный технологический процесс

Анализ производительности различных технологий печати проведен на детали (рис. 1), при изготовлении которой используют поддерживающий материал, что усложняет технологический процесс.

Для производства такой детали может быть применена технология селективного лазерного спекания (*Selective Laser Sintering* — SLS), описанная в [5, 7]. По ней лазер спекает тонкие слои порошкообразного материала, наносимого валиком поверх готового слоя.

Длительность следующих операций, входящих в эту технологию, постоянна и не зависит от детали:

наполнение бункеров сыпучим рабочим материалом ($t_{\text{нап}} = 45 \text{ с}$);

изъятие детали вместе с объемом неотработанного материала из рабочего пространства принтера ($t_{\text{и.д.м}} = 45 \text{ с}$);

изъятие детали из объема неотработанного материала ($t_{\text{и.д.}} = 300 \text{ с}$);

спекание детали в печи ($t_{\text{с.д.}} = 300 \text{ с}$).

Общее время печати для этой технологии описывается выражением

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{нап}} + n(t_{\text{разр}} + t_{\text{спек.сл}}) + t_{\text{и.д.м}} + t_{\text{и.д.}} + t_{\text{с.д.}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{разр}}$ — время разравнивания материала до толщины слоя печати, с;

$t_{\text{спек.сл}} = S_{\text{сл}} / (v d_{\text{л}})$ — время спекания лазером слоя детали, с;

$S_{\text{сл}}$ — площадь печатного слоя, см^2 ;

v — скорость движения лазера по рабочей поверхности, м/с ;

$d_{\text{л}}$ — размер лазерного пятна, м;
 $n = H_{\text{дет}} / T$ — число слоев детали;
 $H_{\text{дет}}$ — высота детали;
 T — толщина слоя печати, м.

Зависимость производительности процесса печати по технологии SLS от скорости v движения лазера по рабочей поверхности при различных размерах $d_{\text{л}}$ лазерного пятна, постоянном времени $t_{\text{разр}} = 6 \text{ с}$ и толщине слоя $T = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, представлена на рис. 2, а. Анализ зависимости показывает, что наращивание скорости v в перемещения луча лазера свыше 3...4 м/с оказывает незначительное влияние на производительность P печати, так как время печати слоя незначительно по сравнению со временем разравнивания $t_{\text{разр}}$ ввиду высокой текущей скорости движения луча лазера.

Производительность P процесса печати по технологии SLS в зависимости от скорости v

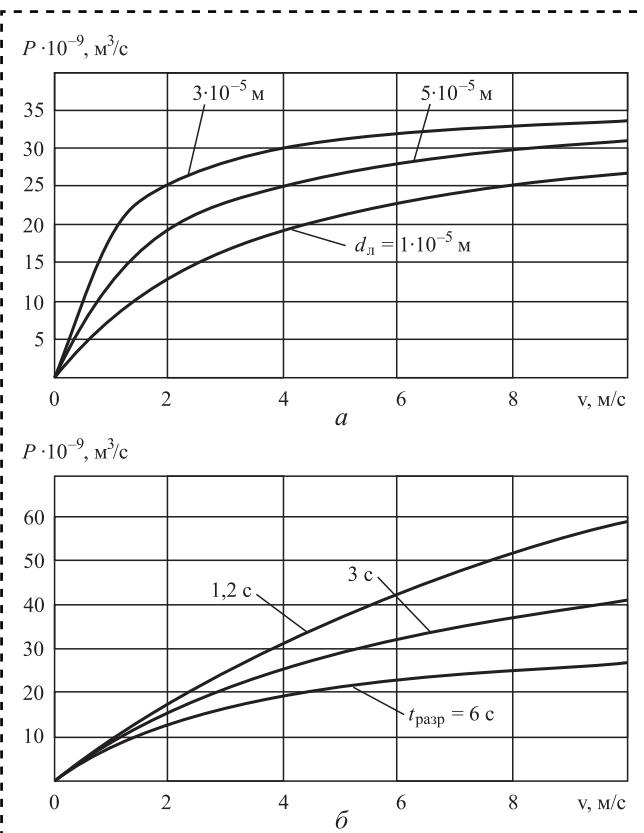


Рис. 2. Зависимость производительности P процесса печати по технологии SLS от скорости v движения лазера по рабочей поверхности при различных диаметрах $d_{\text{л}}$ луча лазера (а) и различном времени $t_{\text{разр}}$ разравнивания рабочего материала (б)



движения лазера по рабочей поверхности при различном времени разравнивания $t_{\text{разр}}$ рабочего материала, постоянном диаметре $d_l = 1 \cdot 10^{-5}$ м лазерного луча и толщине слоя $T = 1 \cdot 10^{-5}$ м представлена на рис. 2, б. Установлено, что сокращение времени $t_{\text{разр}}$ разравнивания рабочего материала позволяет значительно повысить производительность P печати.

Для производства выбранной детали также может быть использована технология послойной заливки экструдируемым расплавом (*Fused Deposition Modeling — FDM*) [8]. По ней деталь формируется путем послойной укладки расплавленной нити рабочего материала. При этом также часть операций имеет постоянную длительность:

установка катушки с нитевидным рабочим материалом ($t_{\text{уст}} = 45$ с);

изъятие детали вместе с поддержкой из рабочего пространства принтера ($t_{\text{и.д.п}} = 6$ с);

время удаления поддержки ($t_{\text{удал}} = 120$ с).

Для печати детали (см. рис. 1) по технологии FDM необходимо использовать поддержку высотой $H_{\text{под}} = 0,13$ м с площадью сечения $S_{\text{под}} = 7,19 \cdot 10^{-4}$ м².

Общее время изготовления детали таким способом можно описать выражением

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{под}} \frac{H_{\text{под}}}{T} + \\ + n(t_{\text{оп}} + t_{\text{сл}}) + t_{\text{и.д.п}} + t_{\text{удал}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{под}} = S_{\text{под}} / (vT)$ — время печати поддержки детали, мин;

$S_{\text{под}}$ — площадь печатного слоя поддержки, см²;

v — скорость перемещения печатающей головки, м/с;

$t_{\text{оп}}$ — время опускания платформы, мин;

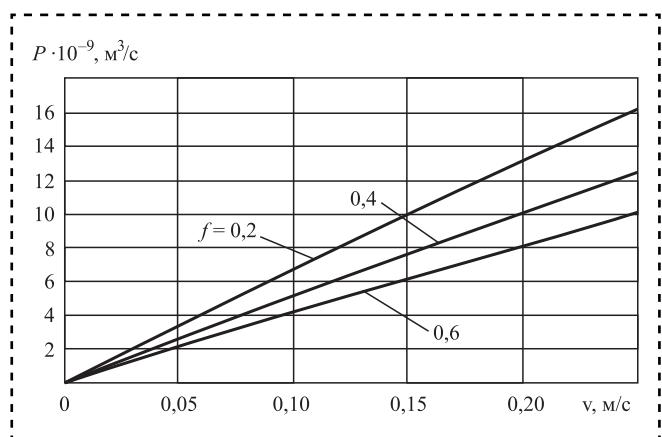


Рис. 3. Зависимость производительности P процесса печати по технологии FDM от скорости v печати при различном коэффициенте f заполнения поддержки

$t_{\text{сл}} = (S_{\text{сл}}f) / (vT)$ — время печати слоя детали, мин;

$S_{\text{сл}}$ — площадь печатного слоя детали, см²;

$H_{\text{под}}$ — высота печати поддержки, см;

f — коэффициент заполнения поддержки, выражающий отношение объема поддерживающей оснастки к суммарному объему поддерживающей оснастки и детали (при $f = 0$ оснастка не используется).

Зависимость производительности P процесса печати по технологии FDM от скорости v печати при различном коэффициенте f заполнения поддержки и постоянной толщине слоя $T = 1 \cdot 10^{-5}$ м представлена на рис. 3. Анализ показывает, что печать поддерживающей оснастки занимает значительное время, уменьшая производительность P . Вследствие снижения коэффициента f заполнения поддержки повышается производительность P , однако для коэффициента заполнения поддержки должно выполняться условие $f \geq 0,2$, иначе поддержка не обеспечит печать выступов выбранной детали.

Сравнительный анализ зависимостей, представленных на рис. 2, показывает, что технология FDM значительно уступает в быстродействии ввиду сложного технологического процесса, вызванного необходимостью печати поддерживающей оснастки.

В связи с этим перспективно использование конструкции многокоординатного стола (рис. 4) с возможностью наклона и поворота для упрощения технологического процесса. Такая конструкция предусматривает размещение рабочей поверхности 1 на поворотном

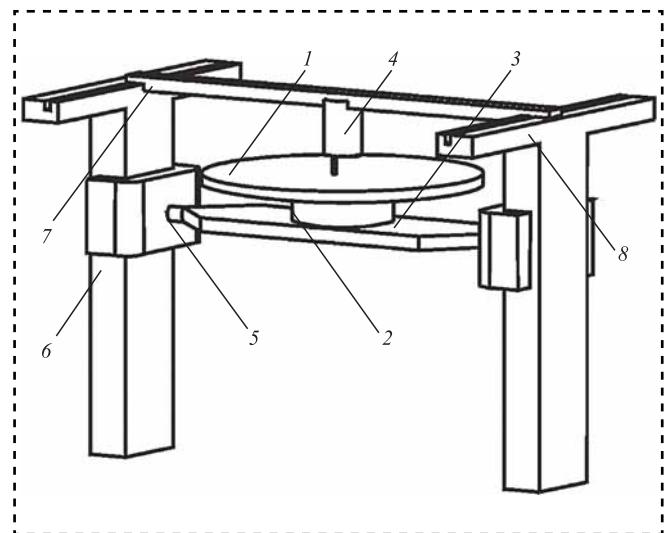


Рис. 4. Многокоординатный стол

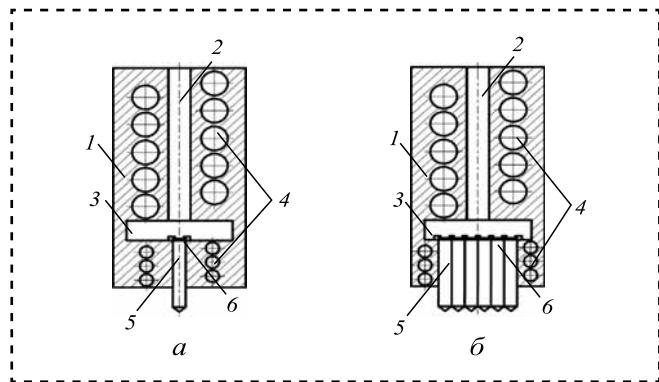


Рис. 5. Печатающая головка:

a — с одним соплом; *б* — с множеством сопел

столе 2, который, в свою очередь, закреплен на подвижной платформе 3, имеющей возможность вертикального перемещения по направляющим 6 и наклона на 90° относительно печатающей головки 4 посредством вала 5. Печатающая головка реализует продольное и поперечное перемещение посредством продольных 7 и поперечных 8 салазок (рис. 5, *a*).

Для увеличения производительности P также перспективно использование печатающей головки с несколькими соплами (рис. 5, *б*) вместо одного. Она состоит из теплоизолированного корпуса 1, входного канала 2, резервуара 3, нагревательных элементов 4, выходных сопел 5, клапанов 6.

Такой процесс печати содержит две операции, постоянные во времени:

установку катушки с нитевидным рабочим материалом ($t_{\text{уст}} = 45 \text{ с}$);

изъятие детали из рабочего пространства принтера ($t_{\text{из.дет}} = 6 \text{ с}$).

Общее время изготовления детали этим способом описывает выражение

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{сл}} \frac{H_{\text{дет}}}{T m^{k-1}} + t_{\text{из.дет}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{сл}} = S_{\text{сл}}/(vT)$ — время печати слоя детали, с;

k — число сопел в печатающей головке принтера;

m — коэффициент увеличения скорости печати слоя от одного дополнительного сопла.

Коэффициент $m \approx 1,8$ отражает непропорциональность зависимости повышения производительности печати с увеличением числа сопел, так как каждое дополнительное сопло задействовано меньше предыдущего. Реализация совокупности разработанных для технологии FDM рекомендаций при различном

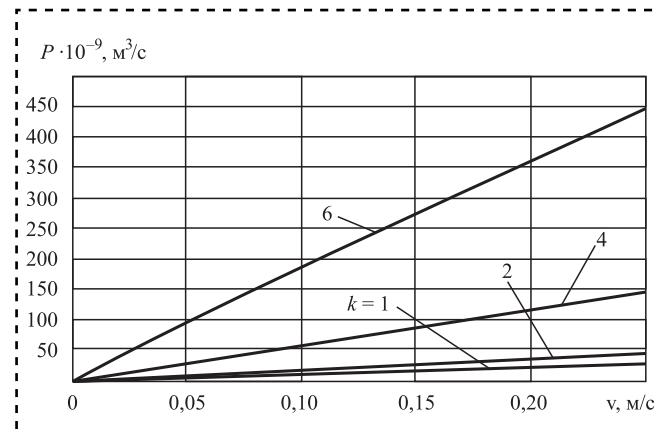


Рис. 6. Зависимость производительности P процесса печати по технологии FDM от скорости v печати при различном числе k сопел

числе k сопел и постоянной толщине слоя $T = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (рис. 6) может способствовать повышению производительности печати до семи раз и позволит превзойти по этому показателю технологию SLS.

Библиографический список

1. Авдеев А.Р., Дроботов А.В., Швец А.А. Использование объемной печати для производства заготовок из легкоплавких металлов // Тез. докл. XVII региональной конф. молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 6–9 ноября 2012 г. Волгоград: Изд. ВолгГТУ, 2013. С. 71–72.

2. Авдеев А.Р., Дроботов А.В., Швец А.А. Анализ устройств для изготовления деталей методом объемной печати // Тез. докл. XIX региональной конф. молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 11–14 ноября 2014 г. Волгоград: Изд. ВолгГТУ, 2015. С. 86–87.

3. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. М.: Изд. НАМИ. 57 с.

4. Пушкарев В.В., Дроботов А.В. Компоновка устройств для объемной печати экструдируемым расплавом деталей сложной формы // Изв. Волгоградского государственного технического университета. Волгоград: Изд. ВолгГТУ, 2013. С. 121–123.

5. Способ спекания деталей лазерным послойным синтезом: Пат. 2450891 РФ, МПК51 В 22 F 3/105 / С.Б. Рыцев и др.; заявитель и патентообладатель Минпромторг России. № 2010141499/02; Заявл. 16.12.2010; Опубл. 20.05.2012; Бюл. № 14. 12 с.

6. Compare 3D-Printers Aniwa: URL: <http://www.aniwa.com/3d-printers/compare-3d-printers/> (дата обращения: 06.06.2015).

7. Method and device for smoothing elements made using the SLS incremental technology: Пат. 2011145960 WO A1. МПК51B29C6700 / Jankowski, Piotr; заявитель и патентообладатель MBM Technology Spolka Cywilna. № PCT/PL2011/000050; Заявл. 11.05.2011; Опубл. 24.11.2011. 6 р.

8. Layered Deposition Bridge Tooling: Пат. 7255821 US. МПК 51 В 29 С 33/40 / William Friedeman, Jr.; and S. Scott Crump; заявитель и патентообладатель Stratasys, Inc. № PCT/US2003/010219; Заявл. 04.04.2003; Опубл. 14.08.2007. 9 р.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

УДК 621:658

В.В. Непомилуев, д-р техн. наук, Е.В. Олейникова, М.В. Тимофеев, канд. техн. наук
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
E-mail: ev.olejnikova@yandex.ru

Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей*

Рассмотрены возможности обеспечения устойчивости процесса сборки изделий машиностроения на основе метода индивидуального подбора деталей путем использования компьютерных технологий и вероятностно-статистических моделей.

The article examines the possibility of improving the quality of the assembly in the machine building by using computer technology and probabilistic-statistical models.

Ключевые слова: сборка, процесс, качество, размер, компьютерные технологии, вероятностно-статистические модели.

Keywords: assembly, process, quality, size, computer technology, probabilistic-statistical models.

Введение

Метод индивидуального подбора деталей при сборке целесообразно использовать в следующих случаях:

имеющееся оборудование и процессы не позволяют изготавливать детали, качество которых обеспечивало бы возможность использования методов взаимозаменяемости;

методы компенсации (регулировка и пригонка) использовать либо невозможно, либо слишком сложно.

В традиционных методах в процессе сборки участвуют случайно выбранные детали, изготовление которых осуществляется параллельно и, главное, независимо друг от друга. При образовании сборочного соединения процесс суммирования погрешностей деталей неуправляем и

параметры качества можно оценить только после окончания сборочного процесса. Все корректирующие действия предпринимаются также только после того, как процесс сборки завершен.

Метод индивидуального подбора деталей основан на принципе подбора деталей до сборки таким образом, чтобы они максимально компенсировали погрешности изготовления друг друга [1]. Точность, достигаемая этим методом, носит вероятностный характер и зависит от количества подбираемых звеньев в размерной цепи: чем большее количество звеньев подбирается перед сборкой, тем выше достигаемая точность замыкающего звена. Управляемость процесса в этом случае обеспечивается введением выполняемой на компьютере дополнительной операции комплектации перед сборкой.

В настоящее время метод подбора используется при изготовлении особо точных изделий и реализуется в основном вручную, что неизбежно ограничивает количество рассматриваемых вариантов и, следовательно, достигаемое качество. В связи с этим данный метод обладает очень высокой трудоемкостью, и далеко не всегда используются его потенциальные преимущества.

Основное преимущество данного метода — существенное повышение точности сборки. К недостаткам относятся высокая трудоемкость, непредсказуемость результата. В связи с высокой трудоемкостью ручной подбор даже при сборке многозвездных размерных цепей обычно ограничивается подбором одного-двух звеньев.

До настоящего времени не решен целый ряд теоретических и практических вопросов, связанных с его планированием, организацией и управлением. Для практического применения метода подбора необходима разработка:

расчетного метода определения достигаемой при его использовании точности;

алгоритмов и программ для компьютерного моделирования процесса сборки;

* Исследования выполнялись в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (НИР 824).

схемы организации информационных потоков процесса производства;

методологии обеспечения робастности процесса сборки.

Обеспечение робастности процесса сборки

Метод индивидуального подбора чувствителен к изменению параметров качества деталей, не контролируемых обычно при их изготовлении, а именно, к виду закона распределения размеров составляющих звеньев и его параметров.

Например, при изменении параметров закона распределения действительных размеров в партиях собираемых деталей могут существенно изменяться параметры замыкающего звена образующейся при сборке размерной цепи (при этом контролируемые параметры качества остаются в пределах допусков).

Таким образом, при реальном осуществлении процесса подбора, даже при полном соответствии параметров качества собираемых деталей требованиям чертежа и ТУ, возможно возникновение существенных отклонений замыкающего звена. Поэтому необходимо разработать методику обеспечения его устойчивости к изменению входных параметров качества — робастности.

Робастность процесса сборки подразумевает устойчивость функциональных характеристик процесса к воздействию факторов, вызывающих их нарушение.

Отклонение параметров качества процесса сборки по отношению к их номиналам при воздействии различных причин можно рассматривать как критерий робастности [2].

Известным японским специалистом в области управления качеством Г. Тагути введено понятие "отношение сигнал—шум", которое стало основным инструментом инженеринга качества. По Тагути [2], функция изделия идеальна при запланированном отношении между сигналами на входе и выходе. Термином "шум" Тагути назвал факторы, являющиеся причиной появления отличий реальных характеристик продукции от идеальных.

К факторам, порождающим шумы процесса сборки по методу индивидуального подбора,

можно отнести возмущения, которые приводят к изменению результата:

неконтролируемые изменения закона распределения и его параметров (чертеж детали содержит требования к допустимым величинам контролируемых параметров качества, но не регламентирует, каким образом должны распределяться действительные параметры качества внутри этих допусков);

изменение технологических условий процесса сборки;

изменение внешней среды.

Для оценки влияния шума на отклонение результатов процесса предлагается использовать критерий несоответствия $Q_{\text{п}}$, который может быть определен как величина, численно равная площади криволинейной трапеции, заключенной между эталонной и реальной кривыми распределения результатов сборки (рис. 1).

Критерий несоответствия характеризует изменение (ухудшение) распределения размера замыкающего звена по сравнению с заплани-

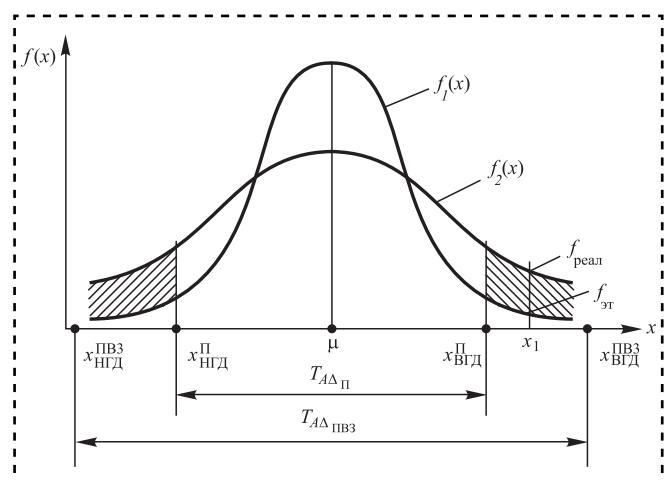


Рис. 1. Геометрический смысл критерия несоответствия: $T_{A\Delta\text{п}}$ — допуск на замыкающее звено для метода подбора; $T_{A\Delta\text{ПВЗ}}$ — допуск на замыкающее звено для метода полной взаимозаменяемости (ПВЗ); $x_{\text{НГД}}^{\text{п}}$ и $x_{\text{ВГД}}^{\text{п}}$ — нижняя (НГД) и верхняя (ВГД) границы допуска на замыкающее звено для метода подбора; $x_{\text{НГД}}^{\text{ПВЗ}}$ и $x_{\text{ВГД}}^{\text{ПВЗ}}$ — нижняя и верхняя границы допуска на замыкающее звено для метода полной взаимозаменяемости; x — независимая переменная — случайная величина, характеризующая размеры замыкающего звена, полученные в результате сборки; $f(x)$ — функция, описывающая плотность распределения вероятностей случайной величины x ; $f_{\text{эт}}$ и $f_{\text{реал}}$ — ожидаемая (принятая за эталон) и реальная плотности вероятностей получения изделия с величиной замыкающего звена x_1 .



рованным (принятым за эталон), т.е. увеличение вероятности появления изделий, размер замыкающего звена которых выходит за границы принятого допуска на него $T_{\Delta p}$, и определяется формулой

$$Q_p = \int_{-\infty}^{x_{\text{НГД}}^p} (f_2(x) - f_1(x)) dx + \int_{x_{\text{ВГД}}^p}^{+\infty} (f_2(x) - f_1(x)) dx. \quad (1)$$

На рис. 1 функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ характеризуют соответственно ожидаемую и реальную кривые распределения, характеризующие процесс сборки и подчиняющиеся нормальному закону:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_1^2}}; \\ f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (2)$$

Для управления процессом формирования качества при подборе деталей необходимо назначить требования к допустимым значениям критерия несоответствия Q_p . Очевидно, что допуск должен быть односторонним, т.е. он должен ограничивать максимально допустимое значение рассогласования, поскольку чем меньше величина Q_p , тем ближе реальное распределение размеров в партии деталей к эталонному. В идеале, при $Q_p = 0$, эти распределения совпадают.

Определение "шумов" процесса позволяет оценивать качество используемого алгоритма подбора, анализировать возможные последствия воздействия шума на процесс. Для процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей такими последствиями могут быть следующие:

неполная собираемость деталей при заданных требованиях к качеству (часть годных деталей на сборке не имеет пары — ни одна из имеющихся сопрягаемых деталей не обеспечивает попадание замыкающего звена в заданный допуск);

несоответствующее качество при заданной собираемости (увеличенное поле рассеяния замыкающего звена при сборке всех имеющихся

деталей, т.е. для части собранных изделий оно будет выходить за пределы назначенного допуска).

Для решения сформулированной выше задачи обеспечения робастности процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей предлагается методика, включающая четыре этапа.

1. Назначение обоснованных требований к качеству замыкающего звена на основе исследования процесса подбора методом компьютерного моделирования. Данный метод базируется на вероятностно-статистической модели процесса подбора [3, 4] и комплексе разработанных авторами компьютерных программ, позволяющих имитировать сборку изделия и наглядно интерпретировать полученные результаты.

Первый этап выполняется в следующей последовательности:

предварительное определение реалистичных допусков на параметры качества составляющих звеньев (задача решается технологом механического цеха на основе анализа возможностей имеющихся технологических процессов изготовления деталей и нормативно-справочной литературы либо, при наличии, экспериментальных данных);

определение границ, внутри которых могут изменяться параметры законов распределения размеров деталей — составляющих звеньев при нормальном осуществлении процессов их изготовления (задача решается аналогично предыдущей);

определение границ, внутри которых с заданной вероятностью будет находиться размер замыкающего звена при нормальном осуществлении процесса сборки из годных деталей (задача решается технологом сборочного цеха на основе использования математической модели процесса подбора [1, 4] и его компьютерного моделирования);

коррекция допусков на параметры качества составляющих звеньев и границ рассеивания размера замыкающего звена (задача решается аналогично предыдущей);

назначение обоснованных требований к качеству замыкающего звена с учетом допустимой вероятности возникновения отклонений и имеющихся возможностей их компенсации

(в качестве мер компенсации могут быть снижены требования к качеству собираемого изделия при обеспечении полной собираемости всех имеющихся деталей либо допущена неполная собираемость в партии деталей при обеспечении заданного качества и т.д.).

2. Определение границ устойчивости процесса подбора при назначенных требованиях к качеству деталей и для заданных требований к качеству его результатов (на основе предложенного критерия несоответствия, а также результатов имитационного моделирования). Допуск на параметр результативности процесса (т.е. на процент изделий, попадание которых в пределы принятого допуска необходимо обеспечить) должен быть односторонним: рекомендуется задать наименьшее допустимое значение из стандартного ряда — 95 или 99 %. Отклонения допустимы только в сторону повышения качества.

Авторами разработаны методика и комплекс компьютерных программ, позволяющих моделировать процесс сборки на основе метода подбора деталей, интерпретировать его результаты. Это позволяет исследовать влияние появления "шума" на изменение результатов процесса сборки, т.е., например, влияние изменения параметров распределения размеров в партиях собираемых деталей на распределение размеров замыкающего звена.

Для удобства анализа полученных результатов было принято, что номинальные значения размеров увеличивающих и уменьшающих звеньев одинаковы и равны $10 \pm 0,5$, закон их распределения — нормальный, номинальное значение размера замыкающего звена равно 0, поле рассеяния его при использовании метода полной взаимозаменяемости — ± 1 . Объем выборок, генерировавшихся для имитации партий собираемых деталей, во всех случаях составлял 200 единиц. Средние значения μ и средние квадратические отклонения σ уточнялись после генерации выборок случайных чисел. В каждом компьютерном эксперименте выполнялись по 20 итераций.

На рис. 2—4 приведены результаты компьютерного моделирования этой

ситуации. На вертикальной оси указана эмпирическая частота появления значения замыкающего звена; на оси "интервалы" — границы значений замыкающего звена; ось "номер итерации" характеризует номер проведенного эксперимента.

3. Назначение допусков на параметры распределения характеристик рассеяния результатов процесса изготовления деталей, к которым чувствителен процесс сборки (т.е. на σ и μ для партий изготовленных деталей). Задача решается на основе компьютерного моделирования процесса подбора по аналогии с решением обратной задачи расчета размерных цепей.

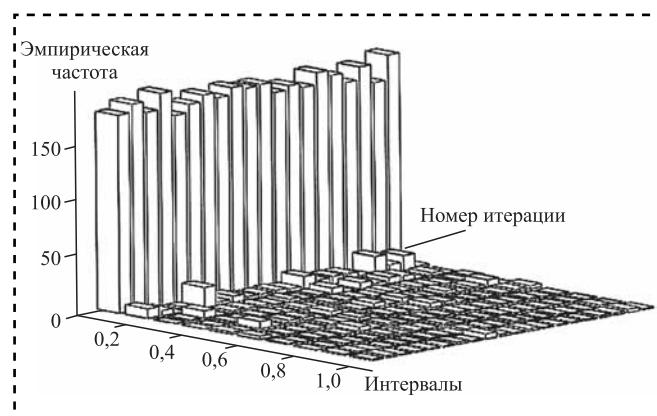


Рис. 2. Распределение результатов процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей при неизменных средних значениях размеров ($\mu_1 = \mu_2 = 9,98$) и средних квадратических отклонениях ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,18$)

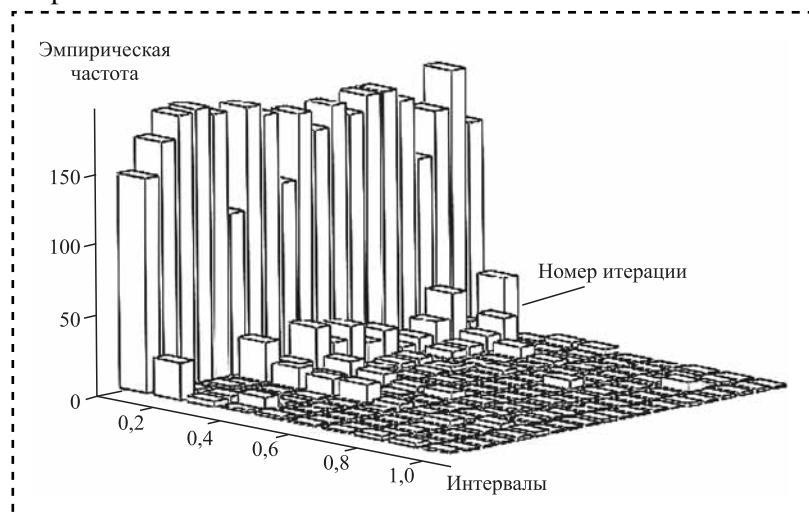


Рис. 3. Чувствительность результата процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей к изменению средних квадратических отклонений при неизменных средних значениях размеров ($\mu_1 = \mu_2 = 9,98$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,18$; $\Delta\sigma = 0,05$)

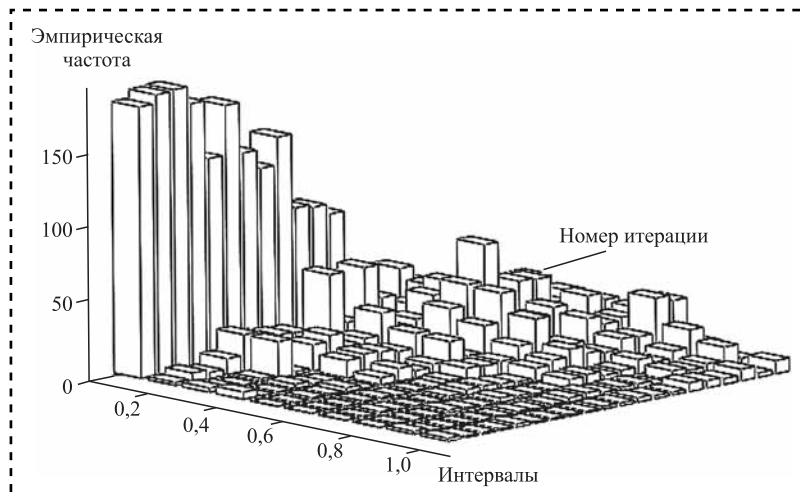


Рис. 4. Чувствительность результата процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей к изменению средних значений размеров при неизменных средних квадратических отклонениях ($\mu_1 = \mu_2 = 9,98$; $\Delta\mu_2 = 0,05$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,18$)

4. Выбор методов контроля, организационного, технического и технологического обеспечения заданных допусков на параметры распределения основных характеристик процесса. Задача решается известными методами. Допуски, которые могут быть независимыми или зависимыми, должны регламентировать пределы, в которых допустимо изменение данного источника шума.

Вывод

Таким образом, появляется возможность устойчиво обеспечивать заданное качество сборки на основе метода индивидуального подбора деталей и робастность процесса сборки к шуму процесса, т.е. к изменению в пределах допусков параметров распределения размеров собираемых деталей.

Библиографический список

1. Майорова Е.А., Непомилуев В.В. Исследование возможностей повышения качества сборки путем использования индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 10. С. 34–38.

2. Taguchi Genichi. Taguchi's Quality Engineering Handbook // John Wiley & Sons, Inc. ASI Consulting Group, LLC, Livonia, Michigan. 2005. 1804 p.

3. Олейникова Е.В. Разработка функциональной модели образования погрешности при использовании метода подбора // Изв. Юга-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии. № 4. 2014. С. 28–32.

4. Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Гусарова Н.И. Вероятностно-статистическая модель процесса индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 1. С. 8–13.



**ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал**

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет.
- С любого номера и на любой срок.
- Без почтовых наценок.

**Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:**

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

E-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.791.048

И.О. Бахоров, В.В. Карабанов, канд. техн. наук
Тел. 8-915-143-59-34

Пайка режущего инструмента

Рассмотрены инструментальные и паяльные материалы, применяемые для изготовления режущего инструмента. Приведены основные требования к выбору инструментальных и паяльных материалов, а также технологии пайки и термообработки инструментов.

Instrumental and soldering materials are considered applied for making of toolpiece. The basic requirements over are brought to the choice of instrumental and soldering materials, and also technology of soldering and heat treatment of instruments.

Ключевые слова: пайка инструмента, быстро режущая сталь, конструкционная сталь, твердый сплав, режущий элемент, корпус инструмента, припой, флюс, пайка-закалка, остаточные напряжения, термообработка.

Keywords: soldering of instrument, high-speed steel, construction steel, carboloy, cutting an element, corps of instrument, a solder, gumboil, soldering is tempering, remaining tensions, heat treatment.

В развитии промышленного производства важная роль принадлежит повышению эффективности процессов металлообработки. Современным машиностроительным и металлообрабатывающим предприятиям требуются большие объемы и разнообразие режущих инструментов различных конструкций и размеров. Объем специального режущего инструмента, выпускаемого по соответствующим отраслевым стандартам в цеховых условиях, составляет до 40 % от общего объема его производства. В СССР была создана специальная отрасль промышленности по производству стандартного режущего инструмента.

Непрерывное внедрение в промышленное производство более прочных и стойких к нагрузкам сталей и сплавов сопровождалось

процессом совершенствования режущего инструмента, созданием новых эффективных инструментальных материалов для обработки металлов [1].

Режущий инструмент (резцы, фрезы и др.) работает при значительных температурно-силовых и циклических нагрузках. Для его изготовления применяются высокопрочные, теплостойкие и износостойчивые стали, имеющие высокую стоимость. В целях снижения стоимости режущий инструмент обычно изготавливают составным: на стальном корпусе (державке) крепится режущий элемент небольшого размера, которым обрабатывается металл [2]. Наиболее эффективным способом их соединения является высокотемпературная пайка.

Обеспечивая высокое качество соединения различных материалов, высокотемпературная пайка является надежным средством внедрения новых инструментальных материалов в производство режущего инструмента.

Методы пайки сочетают возможности роста производительности производства и повышения качества составного инструмента за счет механизации групповой обработки и получения заданных прочностных свойств соединений. При этом процесс пайки инструмента может быть совмещен с процессом термообработки, что позволяет получить заданные физико-механические свойства инструментальных материалов.

История развития инструментального производства неразрывно связана с процессом совершенствования и развития паяльного производства, созданием новых паяльных материалов и технологий пайки.

Корпус режущего инструмента изготавливают из обычных конструкционных сталей марок 45, 40, 40Х, а также из легированных сталей марок 35ХГСА, Х12М, Х12Ф1 и др. Луч-



шими для изготовления корпуса инструмента считаются стали с содержанием хрома 3 % и более.

Режущие элементы в зоне резания подвергаются значительным тепловым и силовым нагрузкам. В неблагоприятных условиях резания в зоне контакта инструмента с деталью происходит интенсивная пластическая деформация срезаемого слоя металла. В результате в месте образования стружки напряжения достигают предела текучести металла, а температура в зоне контакта при больших скоростях резания может быть 900 °C и выше. Поэтому основным показателем материала режущего элемента является теплостойкость, т.е. способность сохранять режущие свойства при перегреве до предельных для каждого материала температур.

Чтобы инструмент был работоспособным, материал режущей части (режущий элемент) должен обладать высокой твердостью, прочностью (в том числе циклической), износостойкостью, теплостойкостью и при этом иметь высокие пластические свойства (в том числе ударную вязкость). Создать материал, который в полном объеме отвечал бы всем этим требованиям, практически невозможно. Поэтому по мере внедрения в промышленность новых более эффективных конструкционных материалов создавались новые инструментальные материалы для изготовления режущих элементов, а также и паяльные материалы для пайки инструмента.

При разработке новых конструкций инструментов с применением быстрорежущей стали и возникновением новых требований к качеству соединений пайке отводится все более ответственная роль. Сокращаются размеры режущей части, изготавливаемой из дорогостоящей стали, что приводит к сокращению площади соединяемых поверхностей. Увеличиваются удельные нагрузки на инструмент и паяное соединение.

Инструментальные материалы для производства режущего инструмента поступают на заготовительные операции в виде прутков, поковок, полос, профильного проката, штучных заготовок и т.д. Горячекатаная сталь используется в мелкосерийном индивидуальном производстве. Кованая быстрорежущая сталь

применяется при изготовлении инструментов больших сечений.

Одними из первых материалов, которые стали применяться для изготовления режущих элементов, были углеродистые инструментальные стали с содержанием углерода от 0,9 до 1,3 % — современные стали марок У9А, У10А, У12А, У13А. Твердость сталей после закалки составляет 63 HRC. Они имеют достаточно высокую прочность, но низкую износостойкость и теплостойкость, что обуславливает низкую скорость резания металлов [3, 4].

В целях повышения режущих свойств инструмента были созданы низколегированные инструментальные стали (путем легирования углеродистых сталей небольшим количеством марганца, хрома, вольфрама, кремния). К ним относятся стали марок ХВГ, 9ХС, 5ХГСВФ, X16ВФ и др.

В машиностроении возрастает доля применения труднообрабатываемых сталей и сплавов, в связи с чем к режущему инструменту предъявляют повышенные требования по стойкости.

Повышения скорости резания новых материалов удалось добиться благодаря применению высоколегированных инструментальных быстрорежущих сталей. Эти стали характеризуются комплексным введением легирующих элементов (вольфрама, молибдена, ванадия, кобальта), повышающих теплостойкость.

Повышение скорости резания металлов обеспечили режущие элементы, изготовленные из углеродистой стали (0,8 % С) с добавками вольфрама. Было определено, что с повышением содержания вольфрама в стали стойкость при резании повышается в связи с увеличением содержания в ней карбидов.

Внедрение в инструментальное производство вольфрамосодержащих быстрорежущих сталей марок Р9, Р12, Р18 с большим содержанием вольфрама позволило повысить допустимую скорость резания в 2...4 раза, а стойкость инструмента — в 20...30 раз по сравнению с инструментом с режущими элементами, изготовленными из углеродистых и легированных сталей.

Сталь Р18 считается эталонной маркой, по отношению к которой оценивают свойства других марок быстрорежущих сталей.



Стремление повысить режущие свойства быстрорежущих сталей и сократить расход имеющего высокую стоимость вольфрама привело к созданию более 40 марок быстрорежущих сталей. Путем дополнительного легирования получены стали следующих марок:

молибденом — Р6М3, Р9М4;

ванадием — Р9Ф5, Р12Ф3, Р18Ф2 и др.;

кобальтом — Р9К5;

без содержания вольфрама — ЭК-41, ЭК-42.

В 1969 г. в инструментальной промышленности сталь Р18 начали заменять на более дешевые вольфрамомолибденовые стали с повышенным содержанием углерода. Для труднообрабатываемых сталей применяли быстрорежущие стали, содержащие кобальт и повышенное количество ванадия — Р6М5К5, Р9К10, Р12Ф3 и др.

Кобальт и ванадий повышают эксплуатационные свойства и износостойкость инструмента. Кроме того, кобальт способствует увеличению остаточного аустенита в стали, что устраняет опасность трещинообразования в стали при охлаждении в процессе пайки.

В XX в. был разработан новый способ производства быстрорежущей стали методом порошковой металлургии, при котором жидкая сталь распыляется в среде аргона с образованием мелкозернистого порошка, который затем подвергается спеканию с последующей пластической деформацией (например, стали марок Р6М5Ф3-МП, Р6М5К8Ф2-МП и др.). Такие стали применяются в инструментах, предназначенных для обработки высокопрочных, жаропрочных, закаленных и труднообрабатываемых сталей и сплавов. Скорость резания при применении инструмента с режущими элементами, изготовленными из порошковых сталей, возрастает в 2...6 раз.

В настоящее время основной объем производства режущего инструмента из быстрорежущей стали приходится на сталь марки Р6М5. С 1980 г. выпускается сталь Р6АМ5, содержащая азот.

Ввиду большого разнообразия марок быстрорежущей стали выбор марки для конкретных условий эксплуатации режущего элемента и предварительную оценку эксплуатационных свойств инструмента производят по таблицам ГСССД 41—82 и ГОСТ ГСССД 27—81, где при-

веденены физические свойства сталей в состоянии поставки и после различных стадий термической обработки.

Подавляющее большинство быстрорежущих сталей плохо свариваются с конструкционной сталью. Это ограничивает применение сварки при изготовлении инструмента.

Способ высокотемпературной пайки обеспечивает высокое качество и надежность при изготовлении быстрорежущего инструмента из различных по химическому составу и структуре инструментальных материалов. Пайка является эффективным и доступным способом оснащения инструмента минимально необходимой массой дорогостоящей быстрорежущей стали. При разработке и освоении новых инструментальных быстрорежущих сталей, а также новых конструкций инструмента паяным соединениям отводится все более ответственная роль в связи с уменьшением паяемых поверхностей и увеличением удельных нагрузок при резании.

Соединение режущего элемента, выполненного в виде пластинки, изготовленной из быстрорежущей стали, с корпусом инструмента (державкой), изготовленного из конструкционной стали, выполняют с применением высокотемпературных припоев на медной основе (температура плавления 880...950 °C), никелевой основе (температура плавления 1150...1200 °C) или железной основе (температура плавления 1150...1240 °C). Температура пайки должна соответствовать температуре аустенизации конструкционной стали инструмента.

При пайке быстрорежущего инструмента используются практически все способы нагрева, применяемые в паяльном производстве.

Инструмент собирают под пайку с соответствующим для каждого способа нагрева зазором и в зависимости от коэффициента линейного расширения паяемых металлов. Инструменты паяют в ваннах, печах, на установках, использующих нагрев токами высокой частоты (ТВЧ) и газопламенными горелками [4].

Наиболее простым и производительным способом пайки быстрорежущего инструмента является способ погружения его в расплав припоя.

Установка для пайки состоит из трех ванн. В первой ванне находится расплавленная



смесь поваренной соли и хлористого бария, в которой производится предварительный нагрев инструмента до 600...700 °C.

Во второй ванне находится расплавленный припой, который покрыт слоем расплавленной соли, обеспечивающей его защиту от окружающего воздуха. Пайка производится погружением в расплавленный припой при температуре, на 30...60 °C превышающей температуру плавления припоя. Для уменьшения расхода припоя его уровень поддерживается таким, чтобы можно было погружать только припаиваемую режущую часть инструмента. При этом основная часть корпуса погружается в расплавленный слой соли. После пайки инструмент полностью погружается в расплав припоя для окончательного нагрева.

На следующем этапе инструмент переносится в третью ванну с закалочной средой. Погружение в нее происходит таким образом, чтобы режущий элемент инструмента находился вне закалочной среды.

При массовом производстве инструмента наиболее производительным и экономичным является способ пайки в печах с восстановительной газовой средой, которая в процессе пайки очищает поверхность инструмента от оксидных пленок путем восстановления из них металла, защищает поверхность металла от воздействия воздуха и от обезуглероживания. Отсутствие оксидных пленок на паяемых поверхностях инструмента обеспечивает высокое и стабильное качество паяных соединений.

Наиболее высокие восстановительные свойства имеет сухой, очищенный от примесей водород, но из-за взрывоопасности его применение ограничено. Водород применяют при пайке высоколегированных сталей в печах небольшого объема.

В массовом производстве широко применяется смесь водорода с азотом. При содержании водорода в смеси менее 10 % смесь невзрывоопасна. Перед применением азотно-водородную смесь очищают от примесей кислорода и паров воды.

Большое распространение в качестве восстановительной газовой среды

при пайке получил диссоциированный аммиак, который при нагреве до 600 °C в присутствии катализатора (оксиды железа) разлагается на водород и азот:



Благодаря высокому содержанию водорода полученная смесь газов восстанавливает оксиды сталей и сплавов, содержащих легкоокисляющие элементы (хром, марганец, кремний). Недостатком диссоциированного аммиака является его взрывоопасность, поэтому в полученную смесь добавляют азот.

Технически чистый аммиак содержит 1...2 % влаги. Для сушки аммиака применяют гранулированный селикогель.

При мелкосерийном производстве инструмента используют камерные печи с электронагревом. Они имеют камеру нагрева, в которой поддерживается температура до 1100 °C, камеру охлаждения, а также приемную и выпускную камеры.

При штучном производстве инструмента могут быть использованы лабораторные печи. При массовом производстве инструмента пайку проводят в печах непрерывного действия типа СКЗ (рис. 1). Применение таких печей обеспечивает стабильность качества паяных соединений, позволяет максимально механизировать и автоматизировать процесс пайки инструмента за счет групповой обработки.

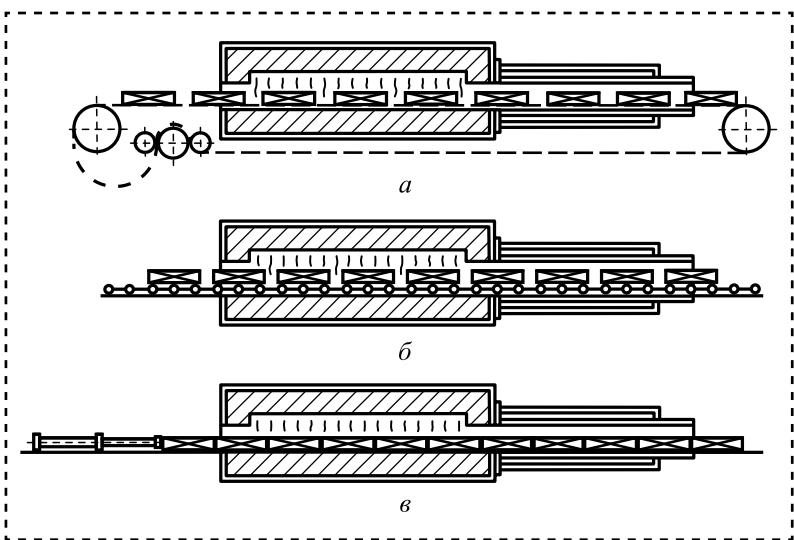


Рис. 1. Печи непрерывного действия:
а — с конвейером; б — с роликовым подом; в — с толкателем



Электропечи типа СКЗ состоят из камеры нагрева, камеры охлаждения и конвейера. Камера нагрева разделена на две или три тепловые зоны, температура в которых регулируется автоматически. Камера охлаждения состоит из трех водоохлаждаемых секций.

Транспортировка инструмента через камеру нагрева и соединенную с ней камеру охлаждения осуществляется плетеной из проволоки конвейерной лентой. Движение конвейера осуществляется от привода постоянного тока, позволяющего регулировать скорость движения конвейерной ленты. Восстановительные газы подают в рабочее пространство печи через патрубки на боковой стенке камеры нагрева. В печи предусмотрены необходимые блокировки, световая и звуковая сигнализации.

Корпус инструмента должен обладать высокой прочностью, достаточной для передачи усилия от станка к режущему элементу. Необходимая прочность корпуса обеспечивается не только подбором соответствующей стали для его изготовления, но и путем термообработки после пайки. Учитывая сопоставимость температур пайки и термообработки корпуса инструмента, появилась возможность совмещения процессов пайки быстрорежущего инструмента с его закалкой.

В рамках отработки технологии по совмещению процесса пайки с термообработкой институтом ВНИИинструмент совместно с НПО "ТУЛАЧЕРМЕТ" созданы новые порошковые самофлюсующие припои типа ПЖ60НХБ (ТУ-1-3687—84) для пайки режущего инструмента по режиму "пайка-закалка". Температура плавления припоя составляет 1170 °С. Пайка производится при температуре 1200 °С и выше.

Припои выпускаются обычно в виде пасты, что позволяет создать, по существу, новый технологический процесс изготовления режущего инструмента с высокими технологическими и эксплуатационными показателями. Паста припоя перед нанесением должна быть тщательно перемешана до получения равномерной консистенции по всему объему. На места пайки пасту наносят из расчета 0,5 г/см² паяемой поверхности. После сборки инструмента производится подсушка пасты при комнатной температуре в течение 3...4 ч или при температуре 100...150 °С в течение 20 мин.

Способность припоя самофлюсоваться при пайке в обычных соляных ваннах обеспечивает высокое качество паяных соединений и открывает широкие возможности производства паяного быстрорежущего инструмента в различных отраслях промышленности.

Припой может быть использован и при других технологиях пайки, обеспечивая высокое качество быстрорежущего инструмента.

Припой не имеет ограничений по химическому составу паяемых сталей, обеспечивает прочность соединений на уровне прочности паяемых металлов.

Качество и прочность паяных соединений, выполненных в режиме "пайка-закалка", не зависят от количества основных и легирующих компонентов в быстрорежущей стали. Решающее значение имеет температура закалки быстрорежущей стали, так как процессы формирования паяного соединения проходят при той же температуре (1170...1250 °С).

Температура пайки припом ПЖ60НХБ составляет 1220 °С. Прочность паяных соединений элемента из быстрорежущей стали с корпусом инструмента составляет 400...500 МПа.

Основным видом оборудования, применяемым для термической обработки инструмента, являются соляные ванны. При пайке инструмента, совмещенной с его термической обработкой, используется оборудование, применяющееся для термической обработки быстрорежущих сталей.

Основным направлением развития термических цехов инструментального производства является механизация и автоматизация процессов термической обработки быстрорежущего инструмента на основе использования комплексов соляных ванн.

Схема процесса пайки-закалки на полуавтоматическом агрегате показана на рис. 2.

В единичном или мелкосерийном производстве инструмента для нагрева и охлаждения быстрорежущего инструмента используют электродные и тигельные соляные ванны различных типов и конструкций.

Пайка газовой горелкой применяется в условиях штучного или мелкосерийного производства. Способ малопроизводителен, требует повышенного внимания и высокого мастерства паяльщика, так как температура пламени

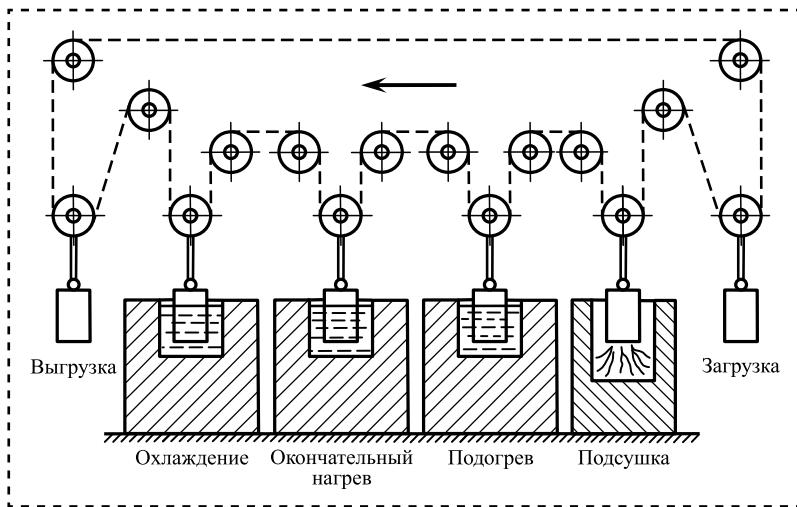


Рис. 2. Схема пайки-закалки на полуавтоматическом агрегате

горелки может вызвать перегрев и окисление твердого сплава и припоя. При пайке нельзя касаться инструмента окислительной зоной пламени.

Лучшие результаты получаются в случае, если газовая горелка устанавливается неподвижно, с таким расчетом, чтобы ее пламя было направлено вверх, а инструмент (режущий элемент) располагают над пламенем, закрепляя в тисках или другом подобном устройстве. При этом нагрев инструмента происходит со стороны, противоположной твердосплавной пластине режущего элемента.

При таком способе нагрева обеспечивается возможность прогрева места пайки той частью факела, где нет избытка кислорода и температура пламени составляет 1000...1300 °C. Руки паяльщика при этом свободны и он легко может следить за нагревом, при необходимости поправлять припаиваемый режущий элемент, вносить припой и флюс. Подача кислорода и ацетилена должна быть отрегулирована так, чтобы образовывалось нейтральное или слегка восстановительное пламя.

По мере совершенствования промышленного производства возрастают требования к свойствам паяных соединений, потребность в новых более эффективных паяльных материалах.

Ведущим предприятием, осуществляющим разработку новых и производство припоеv и флюсов для пайки инструмента, является институт "ВНИИинструмент". Производимые там высокотехнологичные припой на медной,

железной и никелевых основах обеспечивают равные показатели качества соответствующих паяных соединений и их зарубежных аналогов, выполненных припоями на серебряной основе (экономия на материалах для пайки в 10...15 раз).

Самофлюсующие припой на железной основе типа ПЖ60НХБ позволяют получать прочные (на уровне сварных) соединения быстрорежущих и конструкционных сталей всех марок. Стойкость соединения элементов из быстрорежущих сталей с корпусом из конструкционной стали в 1,6...2,5 раза выше по сравнению со стойкостью цельного. Эти соединения более теплостойкие.

В последнее время разработана и производится широкая номенклатура более эффективных припоеv на медно-цинковой основе типа ПИ. Припой ПИ8 и ПИ12 выпускаются в виде самофлюсующих закладных деталей.

Паяные соединения инструмента подвержены термической усталости, которая проявляется в снижении прочности за счет окисления. Действие термоциклирования, вызывающего термическую усталость в паяном соединении и понижение прочности, заключается в изменении знака максимальных остаточных напряжений при переходе от нагрева к охлаждению. При нагреве соединения сталь растягивает твердый сплав, при охлаждении — сжимает. В шве возникают продольные сокращения и силовые деформации, изменяющие свое направление. Термоусталость паяных швов различна. Наибольшую термическую стойкость имеют припой ПИ12, ПИ18.

Повышение качества и эксплуатационных свойств инструментального материала является важнейшим фактором повышения эффективности машиностроительного производства, так как именно режущий инструмент определяет достижимый уровень режимов резания и степень использования оборудования. Качество режущего инструмента оказывает прямое влияние на производительность и качество обработки металлов.

Основное направление работ в инструментальной промышленности заключалось в создании



таких режущих материалов, которые в наибольшей степени отвечали бы задачам современного производства — повышению производительности обработки и снижению ее стоимости.

В 1927 г. началось производство паяного твердосплавного инструмента, совершившего техническую революцию в металлообработке. Спеченные металлокерамические твердые сплавы состоят из карбидов вольфрама, титана, tantalа и цементирующего металла (связки) — кобальта. Твердые сплавы изготавливают методом прессования смеси тонкоразмолотых порошков карбидов и связующего металла с последующим спеканием в защитной атмосфере при температуре 1400...1500 °C.

В соответствии с ГОСТ 3882—74 промышленность выпускает три типа спеченных твердых сплавов:

вольфрамовые (ВК) (марки ВК2, ВК4, ВК6 и др.);

титано-вольфрамовые (ТК) (марки Т30К4, Т15К6, Т5К12 и др.);

титано-тантало-вольфрамовые (TTK) (марки ТТ7К12, ТТ8К6 и др.).

По структуре твердые сплавы представляют собой композицию мельчайших зерен карбидов тугоплавких металлов, связанных металлическим кобальтом и никелем. Массовая доля карбидов в сплаве составляет 95...97 % (на кобальтовой связке). Теплостойкость различных твердых сплавов составляет 800...900 °C, что позволяет значительно повысить скорость резания по сравнению с быстрорежущей сталью и обрабатывать труднообрабатываемые, жаропрочные и нержавеющие стали.

Твердые сплавы для режущих инструментов выпускаются в виде прессованных пластинок, соединяемых с корпусом инструмента методом высокотемпературной пайки.

Карбиды вольфрама придают сплаву повышенную теплостойкость, карбиды титана — твердость и износостойкость, карбиды tantalа обладают свойствами и титана, и вольфрама. Разработаны двух- и трехкарбидные твердые сплавы.

Благодаря высокой твердости, теплостойкости и износостойкости твердые сплавы обладают высокими режущими свойствами. Скорость обработки металлов инструментом с твердым сплавом в 2...4 раза выше, чем ско-

рость резания инструментом с быстрорежущей сталью. Инструменты с твердым сплавом обеспечивают качественную обработку труднообрабатываемых материалов.

Вместо кобальта в качестве связки в твердых сплавах могут применяться никель и молибден (ТНМ-20, ТНМ-25, ТММ-30). Находят применение твердые сплавы на основе нитридов и карбонитридов титана (КНТ-16, КНТ-30) для обработки жаростойких сталей.

Последними разработками являются твердые сплавы типа "ХОМ" (ВК10-ХОМ, ВК15-ХОМ), легированные карбидами хрома высокой стойкости, применяемыми при изготовлении труднообрабатываемых материалов.

Составной паяный режущий инструмент, оснащенный твердым сплавом различных марок, находит широкое применение в металлообработке, при обработке древесных материалов, в буровых работах различного назначения, в дорожном строительстве. Твердые сплавы являются одним из основных материалов в инструментальном производстве.

Твердосплавный инструмент применяют в любом производстве, включая и самые маломасштабные. Обычная скорость обработки металлов с использованием твердого сплава составляет 100 м/мин. Дальнейшее усовершенствование твердосплавного инструмента идет в направлении высокоскоростного резания в тяжелых условиях.

Технологические требования к твердым сплавам изложены в ГОСТ 4872—75. Ввиду большого разнообразия марок твердых сплавов оптимальную марку твердого сплава выбирают с учетом условий обработки путем проведения сравнительных испытаний.

Безвольфрамовые твердые сплавы марок ТМ1, ТМ3, ТН-20, ТН-30, КНТ-16 обладают высокой окалиностойкостью. Образующаяся на поверхности твердых сплавов тонкая оксидная пленка выполняет роль твердой смазки, снижающей трение при обработке.

Технологические характеристики твердых сплавов во многом определяют пути припоев, технологии пайки инструмента, допустимые скорости нагрева и охлаждения твердых сплавов при пайке.

В паяном твердосплавном инструменте сочетаются разнообразные по свойствам материалы.



К каждому из них предъявляются специфические требования. Корпус инструмента должен обладать высокой прочностью для передачи усилия от стыка к режущей кромке. Рабочая (режущая) часть инструмента должна обладать высокой износостойкостью режущей кромки в условиях силовых, тепловых, циклических нагрузок. Паяный шов должен обеспечивать прочное соединение рабочей части с корпусом, их целостность и служебные свойства при эксплуатации.

Особенностью пайки твердосплавного инструмента является необходимость соединения совершенно различных по химическому составу и физико-механическим свойствам материалов, коэффициенты линейного расширения которых различаются в 2...3 раза, что приводит в процессе охлаждения, начиная с температуры солидуса припоя, к совместной деформации соединенных припоеем режущего элемента и корпуса инструмента и появлению значительных напряжений (рис. 3).

При нагреве до одной и той же температуры увеличение объема стального корпуса инструмента превышает увеличение объема пластинки твердого сплава. При остывании инструмента усадка корпуса превышает усад-

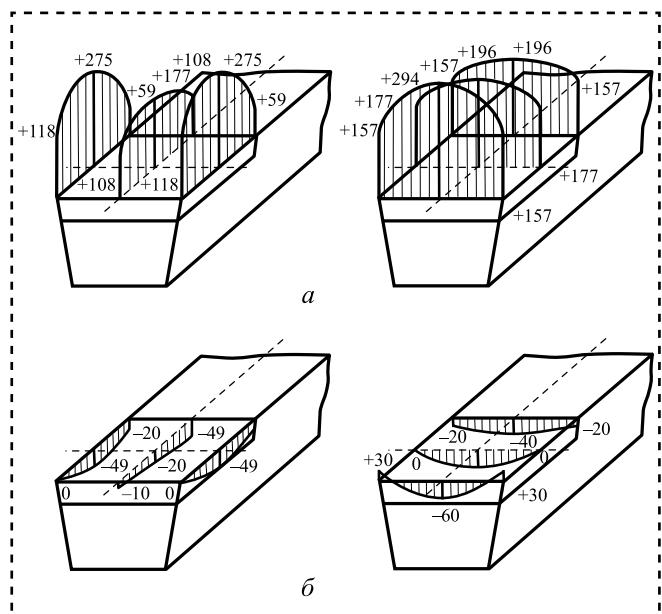


Рис. 3. Эпюры паяльных остаточных напряжений в поверхностном слое пластины из твердого сплава Т5К10, припаянной латунью Л63 к стали марки 45 (а) и стали марки 45ХНМФА (б) (форма 0231), после охлаждения на воздухе (числовые значения приведены в МПа)

ку пластинки твердого сплава. Если припаяваемая режущая пластинка и корпус соединены припоеем и остыдают как единое целое, то из-за разности их объемов в паяном соединении возникают внутренние растягивающие напряжения в поверхностном слое пластинки из твердого сплава, которые способствуют износу режущего инструмента, а складываясь с растягивающими напряжениями от изгиба пластинки под действием сил резания, могут привести к его разрушению. После остывания паяного соединения эти напряжения так велики, что превышают предел прочности материала пластинки, вследствие чего в поверхностном слое пластинки появляются микротрещины или сплошные трещины. Практика показывает, что при нарушении технологии пайки стального корпуса с пластинкой твердого сплава группы ТК брак может достигать 70 %.

Влияние разности коэффициентов линейного расширения стали и твердого сплава снижают применением компенсационных прокладок, изготовленных в виде фольги из сплава железа с никелем 45 % — пермаллоя, искусственно увеличивающих пластичность паяного шва и снижающих внутренние напряжения в его зоне. В качестве прокладки также применяют сетку из малоуглеродистой стали.

Толщина компенсирующих прокладок у мелкого инструмента должна составлять 0,2...0,3 мм, у крупного — 0,8...1,5 мм. Хорошие результаты обеспечивает предварительное электролитическое железнение пластинок твердого сплава. Прочность сцепления твердого сплава с державкой повышается в три раза. Слой железа выполняет также функцию компенсирующей прокладки.

Паяное соединение материалов, имеющих различные физико-механические свойства (сталь — твердый сплав), характеризуется как несогласованное. Для получения качественного соединения таких материалов необходимо соблюдать специальные требования, которые были определены еще на стадии освоения твердых сплавов при пайке твердосплавного инструмента медью и латунью (Л62, Л63, Л70) в качестве припоя.

Проведенный анализ эксплуатационных показателей паяного латунью твердосплавного

инструмента показал, что около 20 % инструмента выходит из строя в результате отделения пластинок твердого сплава от корпуса, а также поломок пластинок из-за появления трещин в процессе резания.

Проведенные исследования позволили определить, что надежность паяного соединения в значительной степени зависит от конструкции соединения и толщины паяного шва. Установлено, что опасные остаточные напряжения растяжения в твердом сплаве снижаются с увеличением толщины корпуса инструмента под пластиной твердого сплава, достигая нуля при соотношении

$$m = h_{\text{корп}}/h_{\text{плас}} \geq 3,$$

где $h_{\text{корп}}$ — толщина корпуса, $h_{\text{плас}}$ — толщина пластинки твердого сплава (рис. 4, а).

При меньшем соотношении толщины корпуса и пластинки твердого сплава за счет изгиба корпуса на передней поверхности пластинки возникают растягивающие напряжения, которые, складываясь с напряжением от силы резания, могут превысить предел прочности твердого сплава на растяжение (600 МПа), что приводит к разрушению пластинки (рис. 4, б).

Полученное соотношение толщин корпуса и пластинки твердого сплава стало основным требованием к конструкции режущего инструмента.

Исследования также показали, что напряжения растяжения в поверхностном слое твер-

дого сплава монотонно снижаются при увеличении толщины паяного шва (рис. 5, линия 2). При малых толщинах шва напряжения в поверхностном слое пластинки твердого сплава превышают прочность латуни и при большой протяженности шва по его краям наблюдаются разрывы.

При пайке латунью Л62 у швов толщиной 0,04 мм на внешней стороне твердого сплава растягивающие напряжения были соизмеримы с прочностью твердого сплава на растяжение, а в припое возникали сжимающие напряжения. При толщине паяного шва 0,9 мм напряжения снижаются на 54 %.

Установлено, что прочность паяных соединений с толщиной швов в интервале 0,05...0,15 мм меньше, чем при больших толщинах шва. Наибольшая прочность паяных соединений достигается при толщинах швов 0,25...0,45 мм.

Зависимость прочности паяного соединения от толщины слоя припоя представлена на рис. 5 (кривая 1). Для различных припоев значения напряжений могут быть различны, однако закономерность зависимости от толщины шва сохраняется. Напряжения растяжения в швах малой толщины могут превышать прочность припоя, а растяжение инструмента может приводить к его разрушению при эксплуатации.

Следовательно, в паяных швах разнородных металлов (твердый сплав — сталь) имеется критический удельный объем припоя, способный обеспечить служебные качества пая-

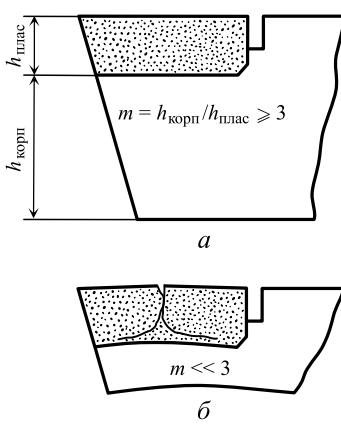


Рис. 4. Рациональная конструкция паяного соединения инструмента при оптимальном соотношении толщин пластинки твердого сплава и стального корпуса (а) и при нарушении соотношения (б)

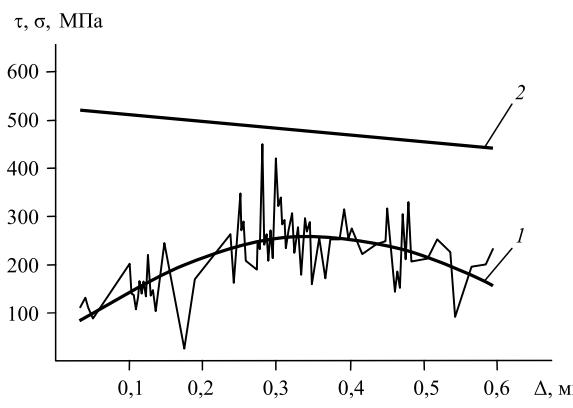


Рис. 5. Зависимость влияния толщины слоя припоя Δ на прочность τ паяного соединения при срезе (1) и изменение напряжений σ в поверхностном слое твердого сплава (2)



ных соединений в зависимости от толщины шва. Соблюдение его оптимальной величины является одним из необходимых условий по получению качественного твердосплавного инструмента.

Причиной отделения пластиинки твердого сплава от корпуса является снижение прочности паяного шва при нагреве режущего элемента инструмента в процессе резания. Установлено, что при эксплуатации инструмента температура в зоне контакта режущей пластиинки из твердого сплава и корпуса инструмента достигает 600 °C.

Нагрев твердых сплавов до температуры пайки и охлаждение с различными скоростями показывает, что резкое охлаждение (в воде, масле) приводит к снижению эксплуатационных характеристик твердых сплавов. Возможно также возникновение видимых дефектов. Поэтому для правильного выбора режима пайки и термообработки инструмента необходимо учитывать влияние температурных воздействий на свойства твердых сплавов.

Термическая обработка приводит к изменению свойств кобальтовой фазы в результате растворно-диффузионных процессов и вызывает напряжения, приводящие к образованию трещин. В процессе выдержки при 1000 °C карбид вольфрама растворяется в кобальтовой фазе. При охлаждении происходит распад образованного раствора, в результате чего кобальтовая фаза обогащается вольфрамом и углеродом. Это изменяет механические свойства твердого сплава и приводит к развитию напряжений в инструменте.

Оптимальной температурой пайки можно считать температуру, при которой происходит образование паяного соединения и не ухудшаются свойства инструментальных материалов. Для всех марок твердых сплавов допустимой считается температура пайки, равная 1050 °C, температура плавления припоя — 950 °C. Термостойкость паяных соединений тем выше, чем выше температура пайки. Поэтому оптимальным для пайки следует считать интервал температур 950...1050 °C.

При разработке новых припоев или выборе марки припоя для каждого конкретного технологического решения помимо прочности припоя, его термостойкости необходимо учитывать возможность припоя образовывать ка-

чественное соединение с заданной толщиной шва. Толщина шва оказывает существенное влияние на свойства инструмента, на остаточные напряжения в режущем инструменте и во многом определяет результаты пайки.

От свойств припоеv во многом зависят сама возможность осуществления этого процесса и выбор способа пайки, температурного режима, а также производительность, работоспособность инструмента.

Механические свойства припоя при комнатной температуре должны быть согласованы со свойствами стали корпуса инструмента, режимом пайки и условиями эксплуатации инструмента. Кроме того, припой должен иметь максимальную пластичность в температурном интервале аустенитных превращений.

Традиционно применяемыми припоями при изготовлении инструмента являются медь и латунь (медно-цинковый припой). Однако существенные недостатки этих припоеv ограничивают их применение в современном производстве твердосплавного инструмента.

При пайке медью высока температура пайки — 1100 °C. При нагреве до 400...500 °C ее прочность снижается в четыре раза. Медь может содержать вредные примеси — свинец и висмут, снижающие механические свойства соединения при высоких температурах. Поэтому медь в качестве припоя можно использовать для изготовления инструмента, эксплуатируемого при малых нагрузках и при невысоком нагреве при резании — до 300 °C.

Латунь (Л62, Л63, Л68, Л70) в качестве припоя применяется только при единичном нагреве инструмента, исключающем его перегрев, приводящий к интенсивному испарению цинка из припоя. Учитывая хорошие технологические свойства меди и латуни при применении их в качестве припоеv для пайки твердосплавного инструмента, они были приняты за базовые припой при создании современных специализированных припоеv на медной основе, обладающих требуемыми технологическими и механическими свойствами для пайки твердосплавного инструмента. Они применяются для пайки инструмента со всеми марками твердого сплава. Характеристики специализированных припоеv на медной основе представлены в таблице.



Характеристики специализированных припоев на медной основе

Марка припоя	Химический состав, %										Температура плавления, °C				
	Основные компоненты										Примеси, не более				
	Cu	Ni	Mn	B	Fe	Si	Zn	Sn	Cr	Al	Pb	Al	Всего	Солидус	Ликвидус
П-102 (ТУ 14-1-2317-78)	Ост.	1...2	—	—	2...4	—	8...10	0,5...1,5	—	—	—	0,3	650	900	
ПрМНМп-68-4-2 (ТУ 48-21-476-79)	62...68	4...5	1,5...2,5	—	—	—	Ост.	—	—	—	—	0,3	950	980	
ПрАНп-0,6-4-2 (ТУ 48-21-476-79)	Ост.	3...4	1,5...2,5	—	—	—	—	—	0,5...0,6	—	—	0,5	1050	1070	
ЛМпЖ-57-1,5-0,75 (ТУ 48-21-299-73)	56...58	—	1	0,07...0,15	0,5...1,0	0,1...0,2	Ост.	—	—	—	0,05	0,02	0,5	865	873
ПАН-23 (ТУ ИЭС 592-86)	Ост.	0..8	0..3	0,1...0,2	0,3...0,6	0...0,5	0..40	—	—	—	—	—	860	870	

Примечания: 1. В скобках под маркой припоя указаны технические условия, по которым припой выпускался ранее. 2. В припое марки ЛМпЖ-57-1,5-0,75 допускается содержание никеля до 1,5% за счет меди. 3. Примеси, не указанные в таблице, учитываются в общей сумме примесей. 4. Содержание бора гарантируется предприятием-изготовителем.



Припои созданы путем легирования меди и латуни элементами, близкими по свойствам к кобальту и придающими припою определенные свойства.

Никель менее дефицитен, чем кобальт, но активнее железа. Он склонен к ликвации из жидкого припоя в условиях взаимодействия с поверхностью твердого сплава. Твердые растворы системы кобальт–никель при кристаллизации паяных швов располагаются по границам твердого сплава, повышая прочность паяных соединений. Присутствие никеля благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах инструмента.

Традиционно в припое вводится марганец (до 4 %), который позволяет повышать при высоких температурах прочность и пластичность припоя, снижая его температуру плавления.

Небольшие добавки алюминия в припое на основе меди, содержащие никель и марганец, повышают эксплуатационные свойства режущего инструмента.

Железо благоприятно влияет на технологические и эксплуатационные свойства припоя, способствуя образованию мелкозернистой структуры.

Кремний и бор как элементы-раскислители способствуют повышению самофлюсующих свойств припоя.

В мировой и отечественной практике базой для разработки специальных инструментальных припоеv на основе меди служат системы Cu–Zn, Cu–Sn, Cu–Mn [2].

Наиболее распространены припои на основе системы Cu–Zn, чаще всего применяемые при пайке с индукционным и электромагнитным нагревом. Для повышения механических свойств припоеv в них вводят железо, марганец, алюминий. К припоям этой системы относятся припои марок ЛМцЖ 57-1,5-0,75 и стандартизованный припой П100, обеспечивающий нормированную толщину паяного шва 0,2...0,3 мм. Температура пайки этими припоями составляет 1000 °C, прочность паяных соединений на срез — 200...300 МПа. Припои обеспечивают высокую надежность инструмента в тяжелых условиях.

Припои системы Cu–Sn обладают ценными специфическими свойствами. Отсутствие в припоях легкоиспаряемых компонентов позволяет использовать их при пайке в печах с газовой средой и в вакууме при сравнительно больших выдержках (3...10 мин) при рабочей температуре.

Припои имеют незначительную объемную усадку (1 %), относительно невысокую температуру пайки, мало чувствительны к перегреву и воздействию газов. Припои легируются никелем, железом, титаном, хромом, алюминием. Благодаря тормозящему процесс растворения олова не происходит растворения и выноса кобальта за пределы твердого сплава, вследствие чего в нем не образуются пористости. Введение в припой титана позволяет применять его при разных способах пайки.

Представителем этой группы припоеv является припой марки П102 с низкой температурой ликвидуса. Температура пайки составляет 930...950 °C. Из-за низкой температуры ликвидуса припой полностью затвердевает при невысокой температуре, когда значительные сокращения объема корпуса инструмента уже прошли. В результате при пайке этим припоеm остаточные напряжения являются минимальными.

Припой позволяет формировать паяные швы с нормированной толщиной за счет порошковой тугоплавкой составляющей. Паяные соединения имеют предел прочности на срез, равный 245...295 МПа. Припой поставляется в виде пасты или прессованных заготовок.

Припои на основе системы Cu–Mn имеют относительно узкий интервал кристаллизации, вследствие чего ликвация в паяных швах отсутствует. Припои хорошо заполняют сборочные зазоры размером от 0,1 до 0,5 мм. Базовым для припоеv этой группы является сплав, содержащий 65 % Cu и 35 % Mn, имеющий температуру плавления 870 °C. Основными легирующими элементами являются никель, кобальт, кремний.

Паяные соединения, полученные с применением этого припоя, обладают высокой прочностью и теплостойкостью. К припоям этой группы относятся припой марки АНМц 06-4-2 и



припой Пи20, обеспечивающий при температуре пайки 1000 °С получение соединений с пределом прочности на срез, равным 250...300 МПа.

Разработанные специальные припои на основе меди для пайки твердосплавного инструмента выпускаются в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 48-184—81 "Припои для пайки твердосплавного металлорежущего инструмента". Цель стандарта — повышение качества инструмента за счет применения соответствующих припоев в зависимости от его вида и назначения с учетом применения основных способов пайки.

Эффективное развитие отечественного производства паяного твердосплавного инструмента привело к созданию современных припоев, флюсов и оборудования, позволяющих получать паяные соединения со стабильным и высоким качеством.

Разработаны теоретические основы процессов пайки инструмента, конструкционные технологические приемы его изготовления, определена экономическая эффективность применения новых материалов для пайки с учетом особенностей соединяемых материалов.

Стандартизованные специализированные припои на основе меди (представлены в таблице) хорошо растекаются по паяемым поверхностям стали и твердого сплава в условиях флюсовой защиты боратно-фторидными флюсами (Ф100) и рекомендуются для пайки с индукционным и электроконтактным нагревом всех марок твердых сплавов. Припои выпускаются в виде ленты толщиной до 0,6 мм и в виде слитков.

При пайке твердых сплавов припоями на медной основе можно применять в качестве флюса обезвоженную буру или смесь буры с добавками различных солей, активизирующих обезвоженную буру. Для пайки твердых сплавов, содержащих трудноудаляемые оксиды титана, в целях их удаления с поверхности твердого сплава применяют высокоактивный флюс марки Ф100 или смесь флюса с бурой в соотношении 1:1.

При пайке твердого сплава со сталью характер взаимодействия припоя со сталью определяется ограниченной взаимной растворимостью железа и меди. Взаимодействие припоя с твердым сплавом более сложное, поскольку металлокерамические твердые сплавы представляют собой систему двух и более фаз, различно взаимодействующих с припоеем.

Установлено, что образование паяного соединения твердого сплава со сталью происходит за счет частичного растворения паяемых металлов припоеем на основе меди при температуре пайки. В результате взаимодействия кобальтовой фазы с припоеем образуется металлическая связь, определяющая прочность паяного соединения.

Введение во флюс и припой соединений, содержащих металл связующей фазы или ему подобный металл, повышает прочность соединений. В общем случае прочность паяных соединений твердых сплавов со стальным корпусом зависит от содержания кобальтовой фазы. При длительных выдержках и высокой температуре — 1050 °С происходит диффузия и вынос кобальтовой связки из твердого сплава на глубину 10...20 мкм, что приводит к образованию пористости в окколошовной зоне твердого сплава и снижению циклической прочности соединения.

При механических испытаниях паяные соединения, как правило, разрушаются по этой окколошовной зоне твердого сплава, обедненной кобальтом. Каналы карбидного каркаса при кристаллизации шва не заполняются новой фазой из-за различия в параметрах кристаллических решеток новой фазы и кобальта. Обедненная кобальтом зона в сплаве может служить концентратором напряжений при циклических нагрузках на режущую часть инструмента или иметь низкую прочность на сжатие, что приводит к разрушению твердого сплава.

При пайке инструмента припоеем системы медь — олово (П102), легированным железом, никелем, хромом, процесс можно проводить при температурах 1000...1200 °С без образования пористости в твердом сплаве, так как олово тормозит диффузионный процесс.



Припои на медной основе, представленные в таблице (ЛНМц 68-4-2, ЛНМц 06-4-2), по сравнению с медью и латунью обеспечивают более высокую прочность паяных швов при высокой ударной вязкости и повышенной пластичности, что позволяет работать паяному инструменту в наиболее тяжелых условиях резания.

Фирмой "АЛАРМ" (Москва) разработаны новые ленточные припои, пасты и сыпучие флюсы для пайки режущего инструмента при использовании индукционного и газопламенного (открытым пламенем) нагрева [5].

Ленточный аморфный припой П47 толщиной 0,3...0,6 мм изготавливается с использованием технологии быстрого затвердевания расплава. Он применяется совместно с флюсовой пастой ФКП-250. Припой П47 в порошкообразном виде применяется в виде смеси с порошком флюса ПВ209.

При использовании этих паяльных материалов на соединяемые поверхности твердосплавных пластинок и державок рекомендуется наносить лазерные лунки, например, с использованием лазерной установки "КВАНТ-16". Это создает оптимальные условия для растекания жидкого припоя, затекания его в капиллярные зазоры и снижения поверхностного напряжения.

При использовании ленточного припоя П47 на поверхности паза державки твердосплавной пластинки и закладываемого отрезка припоя наносится флюсовая паста ФКП-250.

При пайке ленточным припоеем обеспечиваются равномерное заполнение зазоров, хорошая смачиваемость припоеем поверхностей державки и твердосплавной пластинки, стабильная однородность структуры паяного шва. При использовании паяльной смеси припоя и флюса при газопламенной пайке прочность на срез соединений на 10...15 % ниже, чем при использовании ленточного припоя. Прочность на срез соединений, паяных припоеем П47, на 20...30 МПа выше прочности соединений, паяных с применением таблетированных припоеев П100 и П102.

Использование ленточного припоя П47 и паяльной пасты ФКП-250 наиболее эффективно при индукционной пайке инструмента с тонколезвийными резцами и высокопрочными державками из легированных сталей. Индукционная пайка резцов осуществляется одновитковым индуктором при длительном (15...25 с) нагреве до 1050...1060 °С со стороны массивной державки и производится с постепенным смещением державки с пластинкой в активную часть индуктора с периодическим выключением нагрева (установки).

После расплавления и растекания припоя пластинку прижимают через несколько секунд после схватывания. После охлаждения резцы перемещают на термообработку — отпуск с выдержкой при 200...220 °С в течение 2...4 ч и охлаждение вместе с сушильным шкафом.

В последнее время производится широкая номенклатура высокоэффективных инструментальных припоеев для пайки твердосплавного инструмента марок ПИ8, ПИ12, ПИ18, ПИ20, ПИ25, ПИ26, ПИ27, ПИ30 и др. [6]. Припои выпускаются в виде порошка, пасты, таблеток, ленты и могут применяться при любом способе пайки.

Благодаря легированию медной основы железом, никелем, марганцем обеспечиваются высокая прочность и теплостойкость припоеев. На современном этапе паяные соединения инструмента, полученные с применением этих припоеев, удовлетворяют всем требованиям и при этом обеспечивают повышение стойкости инструмента, работающего при значительных температурно-силовых нагрузках, в 1,5...2 раза по сравнению с другими припоями. Наибольшей стойкостью к таким нагрузкам обладают припои марок ПИ12 и ПИ18, имеющие также повышенную стойкость к термоцикличности. Прочность припоеев на срез составляет 250...350 МПа.

Наиболее широко применяемый припой марки ПИ12, так же как и припой П100, образует при пайке нормированные швы толщиной 0,2...0,3 мм, имеющие прочность 250...300 МПа.



Припои марок ПИ12, ПИ18 в виде самофлюсующих закладных деталей используются при пайке инструмента, оснащенного твердосплавными пластинами практически всех марок. Температура пайки составляет 940...980 °C.

Находят применение новые самофлюсующие припои марок ПИ25, ПИ26, ПИ27, ПИ30, выпускаемые в виде тонкой ленты. Прочность паяных соединений составляет 270...300 МПа, температура пайки — 880...930 °C.

В зависимости от состава твердых сплавов растекание по ним жидких припоев различно.

Смачиваемость пластинок твердых сплавов припоем определяет фазовый и химический составы его поверхностного слоя. В общем случае смачиваемость твердых сплавов вольфрамовой группы припоями на основе меди определяется количеством связующей фазы на основе кобальта.

Смачиваемость твердых сплавов титаново-вольфрамовой и tantalо-титановой групп зависит от количества сложных карбидов, с увеличением которых смачиваемость сплавов ухудшается. Состояние поверхности твердых сплавов зависит от условий их спекания. Плохо смачиваются пластинки твердых сплавов, имеющих темно-серую поверхность. Препятствуют смачиванию сплава оксидные пленки алюминия на его поверхности. Присутствие алюминия в фазах сплава группы ВК считается браковочным признаком.

Различия в смачивании и растекании припоев по твердому сплаву объясняются природой окислов на его поверхности. Сплавы группы ВК легко и интенсивно окисляются с образованием окиси вольфрама (WO), которая легко удаляется механическим или химическим путем с помощью флюсов ПВ200 и ПВ201, буры или борной кислоты.

Сплавы Т30К4 и Т15К6 в состоянии поставки имеют на поверхности тонкие, химические стойкие пленки окислов титана. Их удаление производят гарцовкой или шлифованием.

Смачивание припоями поверхности твердых сплавов облегчают флюсы, содержащие фториды щелочных металлов и других соединений, способствующих разрушению оксидов,

растворению карбидов, связыванию углерода. Если соединения карбидов и оксидов, находящиеся на поверхности, затрудняют смачивание пластин твердого сплава, то возникает необходимость очистки пластины перед пайкой.

Степень раскисления припоя по поверхности твердого сплава пропорциональна содержанию в нем кобальта. Наилучшей растекаемостью обладают припои марок МНМц 68-4-2, латунь Л63 и ПАНМц 0,6-4-2, которые хорошо заполняют капиллярные зазоры.

По паяемости твердые сплавы можно разделить на три группы:

сплавы с хорошей смачиваемостью, паяемостью, высокой температурой трещинообразования (свыше 650 °C), наиболее высокой прочностью паяных со сталью соединений. Этими свойствами обладают твердые сплавы группы ВК с содержанием кобальта выше 4 %;

твердые сплавы группы ВК с содержанием кобальта ниже 4 %, а также сплавы групп ТТК и ТК с содержанием карбидов титана до 15 %. Они обладают низкой температурой трещностойкости (350...550 °C), удовлетворительной смачиваемостью и паяемостью и образуют соединения со сталью средней прочности;

титано-карбидные твердые сплавы с ограниченной паяемостью типа Т30К4 с содержанием карбидов титана выше 15 %. Эти сплавы имеют низкую температуру трещинообразования (350 °C), ограниченную смачиваемость и растекание по ним припоея, а также невысокую прочность.

Показатель трещинообразования характеризуется минимальной температурой нагрева твердосплавной пластинки, при которой возникают трещины при охлаждении пластины в непроточной воде с температурой 20 °C.

При пайке твердых сплавов, входящих в первую группу, стандартные флюсы ПВ200 и ПВ201 обеспечивают получение качественных паяных соединений. При пайке твердых сплавов из двух других групп активности этих флюсов недостаточно и требуется проводить дополнительные операции подготовки поверхности твердого сплава: пескоструйную,



дробеструйную, химико-механическую или электрохимическую.

Эти операции не обязательны при применении флюса марки Ф100. Использование этого флюса позволяет в 4...8 раз увеличить площадь растекания припоя по поверхности твердого сплава и повысить прочность паяных соединений. Действие флюса основано на резком увеличении растекания припоя при наличии следов оксидов на поверхности твердого сплава.

Механизм действия флюса заключается в следующем. При нагревании оксиды, содержащиеся во флюсе, разлагаясь, интенсивно выделяют кислород, который окисляет углерод, способствующий карбидизации поверхности твердого сплава, что резко увеличивает смачивание твердого сплава припоеем на медной основе. После прохождения процесса окисления поверхности твердого сплава флюс Ф100 можно заменить на обезвоженную буру.

Характеристика по паяемости инструментальных материалов позволяет обоснованно выбрать способ пайки, разработать технологию и режимы, предупредить появление дефектов в паяном соединении.

При подготовке пластинок твердого сплава перед сборкой инструмента под пайку с них удаляют поверхностный слой оксидов путем шлифовки поверхностей, дробеструйки, пескоструйки, химико-механической обработки в барабанах со специальной смесью.

Малокобальтовые твердые сплавы подготавливают методом окисления.

Пластинки твердого сплава укладывают на противень или в металлическую корзину и нагревают в электропечи при температуре 800 °C в течение 10...30 мин с последующим удалением оксидной пленки во вращающемся барабане совместно со смесью речного песка (25 %), древесных опилок (15 %) и 15%-го раствора каустической соды.

Перед пайкой собранный инструмент обезжирают в 10...15%-ном растворе каустической соды, после чего его промывают в горячей воде для полного удаления с поверхностей солей и сушат горячим воздухом.

Сборка инструмента заключается в установке пластинки твердого сплава в гнездо корпуса, нанесении на места пайки дозированного количества припоя и флюса, фиксации установленной пластинки путем кернения или закрепления путем обвязки никромовой проволокой или асbestosвым шнуром.

При пайке безвольфрамовых и малокобальтовых твердых сплавов наносится активный флюс Ф100. Вследствие ядовитости флюса при работе с ним требуется наличие эффективной вытяжной вентиляции. Все другие твердые сплавы паяют с применением обезвоженной буры.

Пайку проводят при нагреве инструмента в сборе на установках, осуществляющих нагрев токами высокой частоты, электроконтактным способом (электросопротивлением), в соляных ваннах, в печах с восстановительной атмосферой, газовым пламенем, а также погружением в ванну с расплавленным припоеем. Наиболее предпочтительны первые два способа.

Пайка с применением нагрева электросопротивлением — это традиционный и широко применяемый процесс при изготовлении различных изделий в серийном и массовом производстве, протекающий за счет теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока через соединяемые детали, т.е. соединяемые детали — пластинка твердого сплава и корпус инструмента — при нагреве являются частью электрической цепи. Так как наибольшее переходное сопротивление имеет место между соединяемыми поверхностями, то в этом месте выделяется наибольшее количество теплоты, поддающееся регулированию, что позволяет осуществлять управляемый процесс пайки.

Нагрев электросопротивлением осуществляют на машинах, применяемых для контактной сварки или на специальных установках.

Пайка твердосплавного инструмента электросопротивлением осуществляется в следующей последовательности. Подготовленную под пайку пластинку твердого сплава помещают в паз корпуса инструмента, который зажимают в контактной сварочной машине. Перед

включением машины припаиваемую пластинку покрывают порошком флюса и сверху помещают припой, который, в свою очередь, также покрывается порошком флюса. Чтобы не допустить перегрева, ток в процессе нагрева подается периодически. Во время расплавления флюса контролируют его состояние и количество и при необходимости добавляют.

В момент начала плавления припоя выключают ток и контролируют растекание припоя по пластинке и заполнение им сборочного зазора. Пластинку держат прижатой к корпусу до температуры 800 °C, затем давление снимают до момента прекращения растекания припоя и продолжают прижимать до полной кристаллизации припоя.

Подобным образом проводят процесс пайки с индукционным нагревом (ТВЧ), добиваясь равномерности нагрева соединяемых элементов инструмента путем ограничения скорости нагрева и периодического отключения источника тока. Оптимальная скорость нагрева инструмента с поперечным сечением до 150 мм^2 составляет 30 °C/c, с поперечным сечением до 1000 мм^2 — 60 °C/c. В общем случае скорость нагрева должна быть соизмерима со скоростью теплопередачи от токонесущего слоя вглубь металла.

Сборку под пайку осуществляют в следующей последовательности. В паз корпуса инструмента наносят небольшое количество флюса и укладывают покрытую флюсом компенсационную прокладку. На нее помещают пластину твердого сплава, на которую в зоне ее соединения с корпусом помещают припой, покрываемый слоем флюса. Собранные соединение помещают в индуктор (рис. 6).

При пайке твердосплавного инструмента важным условием получения качественного соединения является обеспечение равномерности нагрева. В этих целях инструмент помещают в индуктор так, чтобы в первую очередь нагревать корпус инструмента. Пластинка из твердого сплава нагревается за счет теплопроводности. При необходимости для выравнивания температуры после прогрева корпуса инструмента индуктор перемещают

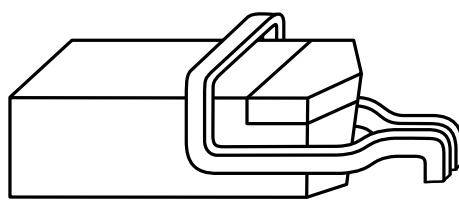


Рис. 6. Петлевой индуктор для напайки однолезвийных инструментов

и производят нагрев непосредственно в месте пайки.

Важное значение при индукционном нагреве имеет направленность индуцируемых в металле токов. При прохождении токов перпендикулярно плоскости пайки создается опасность образования местных очагов тепла в прослойке припоя за счет переходного сопротивления, что может явиться причиной появления трещин в пластинке твердого сплава. Условия формирования паяного шва улучшаются при направленности токов вдоль паяемых плоскостей.

Равномерность нагрева является решающим фактором качественной пайки. Если поверхность пластинки твердого сплава нагрета выше, чем сталь корпуса инструмента, то припой, размещенный на пластинке, при расплавлении смачивает ее по плоскостям пайки, но смачивания паяемых плоскостей корпуса не происходит. Аналогичная ситуация возникает при превышении температуры нагрева корпуса над температурой пластины. При нагрузках это приводит к отрыву пластины по границе спая.

При пайке двойным и многокомпонентным припоеем химический состав в различных участках паяного шва будет неодинаков, что объясняется различной испаряемостью цинка при различных температурах. Неравномерность нагрева инструмента может вызвать обман зрения у паяльщика и привести к преждевременной остановке процесса. Во всех случаях возможная неравномерность при нагреве должна быть устранена к моменту плавления припоя.

Характер нагрева области пайки инструмента можно поменять путем изменения места



нагрева, меняя положение индуктора относительно инструмента и/или регулируя скорость нагрева. Оптимальная длительность индукционного нагрева при пайке инструмента среднего размера при ручном управлении процессом составляет 45...90 с.

Повысить производительность процесса пайки можно только путем одновременной пайки нескольких инструментов (рис. 7) или непрерывного движения партии инструментов (резцов) с последовательным нагреванием в поле действия электромагнитного поля индуктора. При этом паяный инструмент непрерывно выходит из индуктора, а готовый под пайку поступает в него.

Реализация основных особенностей высококачественного нагрева металлов при индукционной пайке обеспечивает высокую скорость и локальность нагрева, гибкость управления температурным режимом пайки. Это создает преимущество перед другими способами нагрева и принципиальную возможность создания оборудования как автономно автоматизированного, так и работающего в едином технологическом комплексе.

В реальном производстве до сих пор преобладает технология индукционной пайки, при которой нагрев производится до температуры визуального восприятия термиста, а регулировка нагревом осуществляется простым включением-выключением установки. Качество пайки в этих условиях зависит от профессионализма термиста. Уменьшение влияния человеческого фактора на качество пайки возможно при наращивании функционально-

сти используемого оборудования и автоматизации процесса пайки.

Пайку инструмента можно осуществить в вакуумной печи или печи с восстановительной атмосферой. При пайке режущих элементов из легированных вольфрамом и твердосплавных сталей на основе карбида титана не требуется применения высокоактивных флюсов независимо от того, с какой сталью их соединяют. Пластины крепят на корпусе инструмента кернением или с помощью проволоки с предварительным размещением компенсационной прокладки припоя и флюса.

Широкое применение в этих условиях находит медно-марганцевый припой П65. При печной пайке может осуществляться групповая пайка инструмента, возможна автоматизация процесса. Применение печей непрерывного действия типа СКЗ позволяет повысить качество паяного инструмента, расширить его номенклатуру, повысить производительность труда в 5...10 раз по сравнению с пайкой на установках ТВЧ, механизировать процесс пайки, повысить специализацию инструментальных заводов. Пайка в печах позволяет производить групповую обработку многолезвийного инструмента в наиболее благоприятных для твердого сплава режимах.

Для печной пайки инструмента применяются все контролируемые атмосферы — водородная, азотная. Технический азот применяют при условии его обогащения газами-восстановителями (CO , H_2 , CH_4) и при его глубокой осушке. При производстве небольших партий инструмента можно осуществлять пайку в контейнерах в обычных электрических печах с окислительной средой.

Оксиды химически активных металлов не восстанавливаются водородом при обычных условиях пайки. Поэтому для разрушения оксидов хрома, кремния, вольфрама и особенно титана необходимо введение флюса в область пайки. Использование флюса необходимо при пайке пластин типа ТК и ТТК со сталью 40Х, 9ХС и другими, содержащими легко окисляющиеся элементы.

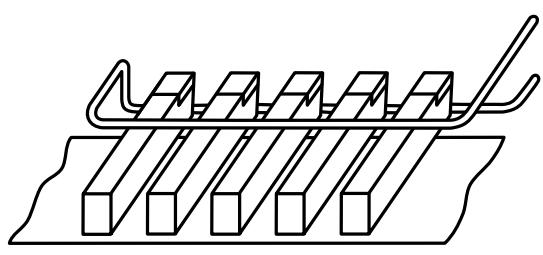


Рис. 7. Удлиненный петлевой индуктор для напайки однолезвийных инструментов



Пайка в печах характеризуется длительностью нагрева и выдержки при температуре пайки. Это определяет необходимость использования припоя, не содержащего легко испаряемого компонента. При длительном нахождении паяемых деталей в контакте с расплавленным припоем протекают полностью растворно-диффузионные процессы, что способствует повышению прочности паяных соединений.

Наиболее простой и надежной является пайка, осуществляемая погружением собранного инструмента в ванну с расплавленным припоем или с расплавленной солью. Этот способ обеспечивает большие скорости нагрева инструмента и равномерное распределение температуры по его объему. Нагрев происходит без использования газовой среды вплоть до температуры пайки 1300 °C. Пайку инструмента погружением в расплавленный припой обычно применяют при совмещении процесса пайки с термообработкой корпуса инструмента.

Процесс пайки-закалки состоит из трех основных операций:

предварительный нагрев в соляной ванне до 800...850 °C;

погружение в ванну с расплавленным припоем;

закалка инструмента.

Предварительный нагрев осуществляют в ванне, содержащей 70 % BaCl₂ и 30 % NaCl. Закалку сплавов марок BK8 и T15K6 проводят в расплаве солей 70 % KOH и 30 % NaOH при температуре 380...400 °C.

При пайке погружением пластина твердого сплава должна быть надежно закреплена на корпусе, а собранное под пайку соединение обработано в кипящем насыщенном водном растворе буры (в случае припаивания пластин из вольфрамовых сплавов) или другом растворе.

В связи с резким различием коэффициентов температурного расширения соединяемых материалов пайку твердосплавного инструмента нельзя вести при высоких температурах, поэтому широкое применение находят припой системы Cu—Zn, например латунь марки Л63.

При пайке твердых сплавов с высоким содержанием кобальта стандартные флюсы ПВ200 и ПВ201 обеспечивают получение качественных соединений. В других случаях применяют флюс Ф100 и/или дополнительные операции очистки соединяемых элементов.

Известно, что получение паяных швов толщиной свыше 0,3 мм с использованием литых припоеv одного состава затруднительно в связи с его вытеканием из зазора. Поэтому наряду с литыми припоями одного сплава разработаны металлокерамические (порошковые) сплавы марок П100, П102 и трехслойный припой ТП1, которые позволяют вести капиллярную пайку при некапиллярных зазорах.

Использование металлокерамических припоеv П100 и ТП1 позволяет получать паяный шов толщиной до 1 мм и более. Паяный шов увеличенной толщины в большей степени, чем более тонкий, компенсирует разность сокращения размеров корпуса и припаиваемой пластины из твердого сплава при охлаждении инструмента после пайки. Это позволяет снизить остаточные напряжения в твердом сплаве.

Увеличение толщины паяного шва достигается за счет содержания в припое неплавящихся в процессе пайки гранул (наполнителя) размером 0,25...0,80 мм. Неплавящиеся гранулы создают в паяльном зазоре лабиринт капилляров, который заполняется плавящейся составляющей припоя. Одним из преимуществ припоя П100 является возможность получения паяных соединений без натеков. Металлокерамические припой могут быть использованы в виде порошков, прессованных пластинок и паст.

Многослойный припой (ТП1) представляет собой многослойную полосу, полученную совместной прокаткой заготовок из разных сплавов. Наружные слои многослойного припоя, плавящиеся в процессе пайки, имеют толщину не более 0,2 мм. Внутренний слой имеет более высокую температуру плавления и служит компенсационной прокладкой, не плавящейся в процессе пайки.

Созданный и внедренный в начале 1970-х гг. трехслойный припой марки ТП1 представляет собой триметаллическую полосу, полученную



прокаткой. Плавящиеся в процессе пайки наружные слои толщиной 0,2 мм состоят из латуни марки ЛНМц 50-2-2, имеют температуру плавления 872 °C. Внутренний слой изготавливается из бронзы марки Бр НБ 7-0,5 толщиной 0,4 мм и имеет температуру плавления 1120 °C. Латунь марки ЛНМц 50-2-2 хорошо растекается по поверхности твердых сплавов. Припой обеспечивает получение паяного шва достаточной прочности, способного компенсировать последствия неравномерного сокращения размеров корпуса и пластины при охлаждении паяного соединения в большей степени, чем другие припои.

Исключительные свойства трехслойного припоя марки ТП1 заключаются в том, что он при меньших усилиях, чем другие припои, может деформироваться во всем температурном интервале от температуры солидуса наружных слоев припоя до комнатной температуры, что связано с относительно низким пределом текучести припоя.

Для получения инструмента высокого качества необходимо комплексное решение всех технологических вопросов, включающих выбор стали для корпуса инструмента, режимов пайки и термической обработки.

В целях сохранения при пайке инструмента структуры и свойств трехслойного припоя ТП1 необходимо соблюдать определенный режим нагрева и охлаждения. Время пайки должно быть на 10...20 с больше, чем время, требуемое для перехода исходной структуры стали корпуса в аустенит. Дополнительные 10...20 с служат полем допуска на время нагрева под пайку. Плавление припоя должно начинаться не ранее, чем за 5...10 с до окончания времени нагрева, так как более длительная выдержка может привести к плавлению промежуточного слоя трехслойного припоя, что недопустимо.

Для получения малонапряженного твердо-сплавного инструмента при пайке с использованием припоя марки ТП1 рекомендуется для его корпуса использовать сталь марки 35ХГСА и применять режимы пайки и термообработки, обеспечивающие переход исходной структуры стали в аустенит.

После пайки и охлаждения на воздухе твердость стального корпуса инструмента должна быть не ниже 34 HRC. Такая твердость может быть получена, если в процессе нагрева при пайке исходная структура стали перешла в аустенит. При охлаждении инструмента после пайки в результате распада аустенита сокращение линейных размеров корпуса стали и пластины твердого сплава в интервале температур от 400 до 20 °C практически одинаково.

Боковые слои припоя марки ТП1 в интервале температур от солидуса до 400 °C имеют предел текучести, не превышающий 10 МПа, и легко деформируются. При дальнейшем охлаждении с 400 °C до комнатной температуры, когда сопротивление деформированию боковых слоев припоя резко возрастает, деформация протекает по внутреннему слою припоя, сопротивление деформированию которого в этом температурном интервале намного ниже, чем у верхних слоев.

Рассматриваемый способ пайки позволяет снизить напряжения, возникающие в твердом сплаве при пайке со сталью, с 520 МПа до 30...50 МПа. Эта технология успешно применяется при производстве инструмента, имеющего наибольшую склонность к образованию трещин в твердом сплаве. Она позволяет исключить появление трещины при пайке и заточке инструмента и сократить число поломок твердого сплава при эксплуатации.

Для получения у корпусов инструмента различных видов одинаковой твердости необходимо после окончания нагрева охлаждать его с постоянной скоростью, а именно 50...100 °C/мин, например, за счет применения различных способов теплоотвода. Для инструмента небольших размеров следует уменьшить теплоотвод, что может быть достигнуто путем охлаждения его в подогретом песке.

Инструмент средних размеров следует охлаждать на воздухе, а охлаждение инструмента больших размеров лучше проводить на решетке с подувом рассеянной струей сжатого воздуха.

На первом этапе отработки режимов при освоении технологии пайки твердость рекомендуется контролировать постоянно. Показатель



тврдости корпуса инструмента является браковочным признаком. После завершения освоения и отладки технологии пайки тврдость рекомендуется проверять выборочно.

Соблюдение термических режимов обработки инструмента позволяет исключить образование трещин в тврдом сплаве и резко понизить поломки инструмента при эксплуатации.

При использовании пайки с применением припоев на основе меди термообработку корпуса совмещают с процессом нагрева и охлаждения при пайке. При совмещении операций пайки инструмента и термообработки стального корпуса требуется нагревать и охлаждать тврдый сплав и сталь корпуса по единому режиму.

Улучшение механических свойств стали достигается закалкой, но быстрое охлаждение тврдого сплава приводит к снижению его прочности при циклических нагрузках, а также к появлению трещин вследствие термоудара в пластинках тврдого сплава. Поэтому технологический процесс изготовления инструмента должен исключать закалку в жидких средах [7].

Для инструментов с высокой прочностью корпусов используют легированные стали мартенситного класса, закаливающихся при охлаждении на воздухе — 18Х2Н4ВА, 38ХН3ВА, 45ХНМФА и др. Эти стали обеспечивают малонапряженное состояние паяных соединений тврдых сплавов со сталью и в то же время обладают высоким пределом прочности, что необходимо для изготовления инструмента высокой стойкости.

Применение сталей мартенситного класса экономически целесообразно для инструмента, предназначенного для работы в тяжелых условиях, например для буровых коронок. Для обеспечения необходимых физико-механических свойств необходимо применять изотермическую выдержку при охлаждении инструмента при температуре на 50...70 °С выше точки мартенситного превращения стали.

Марку тврдого сплава и стали для корпуса, а также режим охлаждения необходимо выби-

рать в зависимости от назначения инструмента и условий его эксплуатации. Режим пайки должен обеспечивать переход исходной структуры стали в аустенит, а охлаждение должно проводиться по заданному режиму, обеспечивающему получение необходимых механических свойств и требуемой тврдости стали корпуса инструмента.

Если к механическим свойствам корпуса инструмента не предъявляются особые требования, то для их изготовления используют либо сталь марки 35ХГСА, у которой распад аустенита при охлаждении инструмента будет начинаться с 400 °С и протекать вплоть до остывания до комнатной температуры, либо сталь марки 45, распад аустенита у которой при охлаждении на воздухе происходит при температуре 600...700 °С.

В зависимости от назначения инструмента для изготовления его корпуса применяют различные марки стали. Получение заданных механических свойств паяного инструмента обеспечивается, если выбор марки стали для него проводится на основе из анализа термокинетического распада аустенита.

Для предотвращения образования трещин в тврдом сплаве при изготовлении инструмента, а также для исключения его поломки во время эксплуатации остаточные напряжения в нем должны быть минимальными. Для этого угол наклона дилатометрической кривой "линейный размер стали — температура", полученной при охлаждении инструмента после пайки по заданному режиму, должен максимально приближаться к углу наклона аналогичной кривой тврдого сплава в интервале температур от 500...400 °С до комнатной температуры.

Температура пайки, которая обычно на 30...50 °С превышает температуру ликвидуса припоя, должна быть одновременно и температурой нагрева стали под закалку.

Для повышения эксплуатационных свойств твердосплавного инструмента предлагается после пайки подвергать его всестороннему гидростатическому обжатию, что приводит к увеличению прочности на 20...25 % (а.с. № 2436152).



Развитие отечественного производства паяного твердосплавного инструмента привело к созданию современных припоев, флюсов и оборудования, позволяющих стабильно получать паяные соединения высокого качества. Разработаны теоретические основы процесса пайки инструмента, конструктивные и технологические приемы его изготовления и создания новых конструкций.

О широких технологических возможностях и высокой эффективности способов пайки свидетельствует современное производство паяного бурового инструмента, эксплуатируемого в тяжелых и экстремальных условиях [8].

Пайка является основным способом соединения твердосплавных пластин с корпусом породоразрушающего горного инструмента, к которому относятся буровые долота (шаро-

щечные и лопастные), бурильные головки и буровые коронки, угольные и породные электросверла. Режущий инструмент разрушает породу, отделяет от нее стружку в результате непрерывного статического и динамического воздействия в процессе перемещения режущих элементов (резцов). Предприятиями горного машиностроения выпускаются миллионы буровых коронок с твердосплавными вставками.

К основным элементам буровых резцов относятся рабочая часть (головка, армированная твердосплавной пластиной) и державка (корпус), переходящая в хвостовик, предназначенных для закрепления инструмента в исполнительном органе.

Твердосплавные коронки (рис. 8) для колонкового бурения предназначены для вращательно-ударного и вращательного способов проходки геологоразведочных скважин. Коронка представляет собой стальной цилиндр, на одном конце которого нарезается резьба для соединения с колонковой трубой, а на другом крепятся с помощью пайки твердосплавные пластины.

Библиографический список

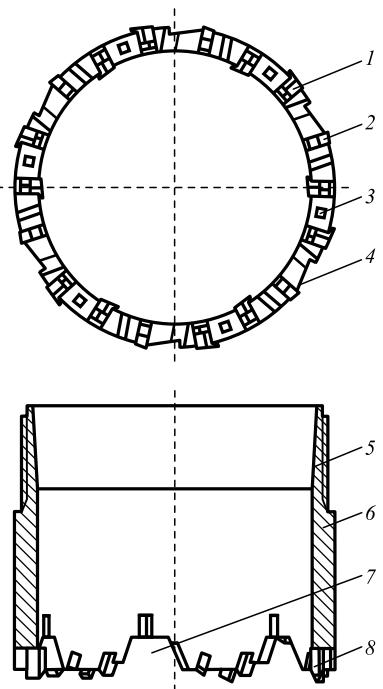


Рис. 8. Основные элементы корпуса и режущей части резцовой коронки:

1 — основной подрезной резец; 2 — дополнительный подрезной резец; 3 — основной резец; 4 — шламовый паз; 5 — конусная расточка; 6 — корпус; 7 — промывочные пазы; 8 — внутренний подрезной резец

1. Гаврилов В.Н. Производство металлорежущих инструментов: учеб. пособие. Челябинск, 1981. 245 с.

2. Имшенник К.П. Составной режущий инструмент. М.: Машиностроение, 1995. 206 с.

3. Современные режущие инструментальные материалы. Н. Новгород: Металлургия, 2010. 400 с.

4. Технология изготовления режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1979. 136 с.

5. Пайка металлов: справочник / под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.

6. Иванов И.Н., Кузнецова Г.П. Проблемы смачивания припоями поверхностей твердых сплавов при пайке инструмента // Сборник "Пайка — 2010". Тольятти: ТГУ, 2010.

7. Технологические процессы пайки твердосплавного металлорежущего инструмента. М.: Изд. ВНИИТЭМП, 1995.

8. Коган Б.И. и др. Основы пайки, технология пайки буровых резцов: учеб. пособие. Кемерово: Изд. КузГТУ, 2006. 58 с.

(Окончание следует)

РАЗБОРКА. РЕМОНТ

УДК 658.52.011

А.Н. Рыкунов, д-р техн. наук (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
В.И. Котельников, канд. техн. наук (Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева)
E-mail: rykunov2007@yandex.ru

Сборка механизмов из восстановленных при ремонте деталей

Приведена технология сборки механизмов с использованием восстановленных наплавкой и обработанных на номинальные размеры деталей при ремонте машин и механизмов.

The technology of mechanisms assembly using restored parts (parts restored by welding and processed on the nominal dimensions) in repair of machines and mechanisms.

Ключевые слова: точность сопряжения, изделие, сборочная единица, комплект, базовая деталь, поверхностное пластическое деформирование, шероховатость.

Key words: precision pairing, the product, assembly unit, complete set, the base part, surface plastic deformation, roughness.

В общем объеме ремонтно-восстановительных работ по трудоемкости сборочно-разборочные работы составляют 30...87 %. Трудоемкость возрастает с увеличением количества соединяемых деталей и сложности их конфигурации. При различных видах ремонта, соответственно, растет объем подготовительных работ перед сборкой и пригоночных операций по ходу сборки [1].

В целях удешевления собираемых изделий, уменьшения трудоемкости сборки и экономии энергетических ресурсов в ремонтном производстве целесообразно восстанавливать изношенные поверхности шеек валов и отверстия в корпусных деталях наплавкой с последующей механической обработкой резанием на заданные чертежом размеры. Это наиболее актуально в полевых условиях. В этом случае на 30...60 % снижается объем подготовитель-

ных работ, включая комплектацию сборочных единиц, а пригоночные работы исключаются почти полностью.

Эффективным методом восстановления заданных размеров деталей после наплавки является обработка наплавленного на изношенную поверхность металла резанием с нагревом с последующей обработкой нагретой поверхности поверхностным пластическим деформированием.

Данный процесс прост в реализации и может быть применен на любом ремонтном предприятии. При нагреве металла пламенем горелки (индуктором токов высокой частоты) наплавленный металл теряет прочность, а его пластические характеристики возрастают. В результате снижается сопротивление металла резанию.

Эксперименты показывают, что эффективность такой обработки стальных деталей сохраняется при работе с большими глубинами t (до 10 мм) и подачами S (до 0,52 мм/об.) практически во всем диапазоне рациональных скоростей резания V , м/с. Нагрев поверхности стальной детали целесообразно доводить до появления устойчивого красного цвета нагретой поверхности, что соответствует температуре 550...650 °C. Помимо наибольшей эффективности (максимальна размерная стойкость инструмента) такой режим нагрева легко контролировать визуально.

Резание с нагревом практически исключает вибрации режущего инструмента, а его стойкость возрастает до 2,5 раз (исследовались двухкарбидные твердосплавные пластины, рекомендуемые для обработки сталей). При этом исключаются и возможные потери его стойкости в результате макро- и микровыкрашивания режущей кромки при попадании под резец шлака и неметаллических включений, за-



частую возникающих в наплавленном металле в процессе его кристаллизации [2].

Снижение микровибраций режущего инструмента и сил сопротивления резанию (тангенциальная составляющая силы P при продольном точении снижается до 20 %) приводит к повышению точности размерной обработки и снижению параметров шероховатости обработанной поверхности. В большинстве реальных технологических ситуаций ремонтно-восстановительных работ обработка наплавленной поверхности может быть произведена на заданный размер за один проход режущего инструмента.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) цилиндрических наружных поверхностей охлаждаемым водой накатником (роликом) уплотняет поверхностный слой на глубину до 50 мкм и снижает шероховатость поверхности до уровня отделочных этапов шлифования при холодной обработке металла резанием [3].

Пример режимов комбинированной обработки и среднее значение полученного параметра шероховатости Ra приведены в таблице. В данном случае при обработке стали 40Х ис-

пользовался проходной упорный резец с напайной пластиной Т5К10. Для экспресс-оценки непосредственно на станке среднего арифметического абсолютных значений отклонений профиля применялся прибор типа *Surtronic 10*.

Точность обработки наплавленных цилиндрических поверхностей деталей возрастает прежде всего из-за того, что при резании металла с нагревом до 20 % уменьшаются усилия отжатия детали от режущего инструмента (радиальная составляющая силы резания). В результате статистически достоверно снижаются отклонение формы от цилиндричности, отклонение обрабатываемых шеек валов от соосности, а также торцевые и радиальные биения [4].

Особенностью поверхности, обработанной резанием и ППД с нагревом, является наличие на детали серо-темно-синего налета — воронения, препятствующего окислению поверхности при ее работе в агрессивной среде.

Поскольку размерная точность обработки поверхностей возрастает, то поле допуска собираемых сопряжений с зазором не будет колебаться в широких пределах (как это происходит

Режимы обработки наплавленной заготовки резанием с нагревом и ППД роликовым накатником

Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания роликом поверхности длиной l					Средний параметр шероховатости Ra , мкм
S , мм/об.	t , мм	V , м/с	T , С	Ra , мкм	S , мм/об.	$T_{\text{пов}}$, °С	l , мм	P , Н	$T_{\text{пов}}^{-1}$, °С	
0,28	4,0	0,75	550	2,7	0,28	470	12,5	1000	350	1,0
		1,19	550	2,6						1,0
		1,89	550	2,4						1,0
		2,34	550	2,2						0,9
		2,95	550	2,0						0,9
0,28	6,0	0,75	600	2,3	0,28	520	12,5	950	400	0,8
		1,19	600	2,4						0,8
		1,89	600	2,3						0,8
		2,34	600	2,1						0,7
		2,95	600	1,9						0,7
0,28	8,0	0,75	650	2,0	0,28	570	12,5	920	450	0,6
		1,19	650	1,8						0,6
		1,89	650	1,6						0,6
		2,34	650	1,4						0,5
		2,95	650	1,1						0,5



при обычном резании наплавленного металла). Результатом является снижение трудоемкости комплектации, исключается подгонка по месту и ускоряется процесс сборки. В результате, например, подшипники скольжения, собранные с минимальным зазором из деталей, восстановленных наплавкой и обработанных резанием с нагревом и ППД, обладают на 10...20 % большим эксплуатационным ресурсом.

Известно, что сборку деталей в узле тепловым методом применяют для создания абсолютно неразъемных соединений. Как правило, в таких соединениях значение создаваемого натяга в два раза больше значения натяга, создаваемого прессовым методом. В результате прочность тепловых соединений в 2–3 раза выше прочности прессовых.

Нагрев, в частности, применяют для сборки тяжело нагруженных соединений, требующих высокой прочности. Тепловая сборка применяется также в случае выполнения детали из материала, имеющего высокий коэффициент линейного расширения. Такая сборка необходима для создания соединений, работающих в условиях воздействия повышенных температур.

В ремонтном производстве тепловая сборка применяется не менее широко. Поскольку данный метод исключает использование дорогостоящего прессового оборудования, изделие, собранное тепловым методом, обладает меньшей себестоимостью.

Одним из основных требований тепловой сборки к охватывающей детали является высокая прочность ее материала на разрыв. Металл втулки должен обладать необходимым запасом пластических свойств при заданных техническими условиями на эксплуатацию требованиях к твердости и прочности.

Оптимальным вариантом механической обработки отверстий втулок из конструкционных марок сталей, предназначенных для тепловой сборки, является обработка металла резанием с нагревом срезаемого слоя и ППД обработанной нагретой внутренней поверхности.

Наиболее эффективным способом обработки нагретой внутренней поверхности отверстия втулки является выглаживание. Данный вид обработки позволяет получить уплотненный поверхностный слой без микротрещин (очагов разрыва) при остывании детали в ходе сборки

и эксплуатации), значительно улучшить структуру металла поверхностного слоя отверстия втулки и снизить параметры шероховатости [5].

К положительным сторонам такой обработки отверстия втулки можно отнести также меньшую по сравнению с холодной обработкой величину наклена на поверхности при ППД с нагревом.

Раскрытие специфических механизмов комплексного метода обработки металлов резанием с нагревом и пластической деформацией нагреваемой поверхности детали, а также разработка методики расчета его параметров [2], в том числе стойкостных характеристик твердосплавного инструмента [6], позволили существенно повысить эффективность обработки сварных и наплавленных деталей прежде всего в специфических условиях работы малых и ремонтных предприятий, не использующих дорогостоящего оборудования и инструмента.

Наиболее актуален данный метод для ускорения ремонта техники в воинских частях. Это подтверждается применением этого метода в рамках соответствующих договорных программ.

Библиографический список

1. Котельников В.И. Технология сборки машин и механизмов: учебно-методическое пособие. Н. Новгород: Изд. НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2007. 149 с.
2. Котельников В.И. Основы резания металла с нагревом. Н. Новгород: Изд. НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2011. 199 с.
3. Котельников В.И., Миронов А.Е. Эффективность обработки поверхностей круглым шлифованием и ППД с нагревом // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. № 2 (92). 2012. С. 116–120.
4. Котельников В.И., Кожемякин В.П., Бондаренко Н.И., Барабановский Н.И. Обработка наплавленных поверхностей резанием и поверхностным пластическим деформированием с нагревом // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки отnano- до макроуровня: сб. трудов XIII Международ. науч.-практич. конф. Ч. 1. СПб: Изд. СПбПУ, 2011. С. 176–179.
5. Котельников В.И., Миронов А.Е. Термодинамическая обработка втулок // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. статей X Международ. науч.-техн. конф. Пенза: ПДЗ, 2014. С. 29–33.
6. Рыкунов А.Н., Проскуряков С.Л. Обобщенная взаимосвязь износа твердосплавного инструмента с термомеханическими условиями протекания процессов токарной обработки металлов // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 253–257.

В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.01

В.Д. Аввакумов, канд. техн. наук

(Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Новоуральск)

E-mail: awwam@mail.ru

Особенность расчета плоских размерных цепей

Рассмотрена особенность расчета плоских размерных цепей, заключающаяся в том, что в некоторых сборочных единицах может происходить изменение схем замыкания элементов сборки при изменении размеров в поле допуска. Предлагаются три способа расчета таких размерных цепей. Показано, что наиболее эффективно с точки зрения подготовки исходных данных и достоверности результата расчет размерных цепей с данной особенностью проводится с помощью методастыковки, реализованного в программе СБОРКА.

The feature of calculation of flat dimensional chains which is that in some assembly units there can be a change of schemes of short circuit of elements of assembly at change of the sizes in a tolerance zone is considered. Three ways of calculation of such dimensional chains are offered. It is shown that is the most effective from the point of view of preparation of basic data and reliability of result calculation of dimensional chains with this feature is carried out by means of the method of joining realized in the ASSEMBLY program.

Ключевые слова: сборка, размерные цепи, схемы замыкания, допуски.

Keywords: assembly, dimensional chains, schemes of short circuit, admissions.

Рассматриваемая в данной статье особенность приводит к тому, что для определения некоторого замыкающего звена каждой схеме замыкания соответствует своя размерная цепь. Отсюда вытекает необходимость определять контакты деталей по размерам. Иначе говоря, для каждого набора конкретных значений размеров из их полей допусков необходимо отслеживать схему замыкания.

Таким образом, функция зависимости замыкающего звена от составляющих является сложной (составной) функцией, зависящей от распо-

ложения точек контакта деталей сборочной единицы (для краткости в дальнейшем — сборка).

В общем виде алгоритм решения поставленной задачи такой. Перед вычислением замыкающего звена необходимо определить возможные схемы замыкания деталей в сборке. Далее для каждой схемы замыкания следует определить размерную цепь, по которой будет находиться значение замыкающего звена, т.е. установить функциональную зависимость замыкающего звена от составляющих звеньев. Затем в процессе расчета для каждого набора значений размеров сборки, лежащих в поле допуска, необходимо выявлять схему замыкания и по соответствующей этой схеме размерной цепи вычислять замыкающий размер.

Рассмотрим сборку, в которой отверстие в детали закрывается клапаном (рис. 1). Необходимо найти расстояние между точками O_d и O_k .

Как правило, номинальные значения радиуса сферической части клапана R_k и радиуса сферической части R_d отверстия принимаются равными. Но при наличии допусков фактические значения радиусов могут отличаться. Поэтому точками контакта клапана с деталью могут быть либо точка K_1 , либо точка K_2 (см. рис. 1).

Задачу расчета плоской размерной цепи, представленной заданной сборкой, будем решать тремя способами:

аналитическим;
алгоритмическим;
с помощью виртуальной сборки.

Для первых двух способов будем использовать программу РРЦ [1], для третьего — программу СБОРКА [1]. Следует отметить, что расчетная часть у этих программ одинакова, но разные исходные данные.

Рассмотрим процедуры формирования входной информации для каждого из трех способов.

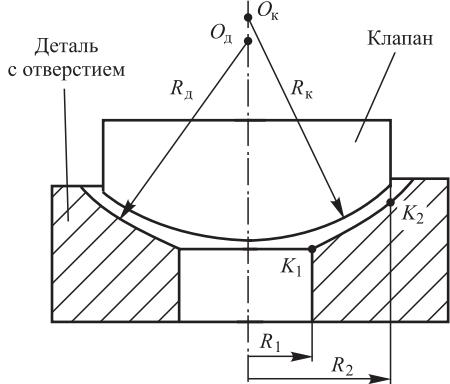


Рис. 1. Сборка с закрывающим отверстие клапаном

Аналитическое решение

Определим искомую величину аналитическим методом, получив для нее необходимые выражения. Для этого рассмотрим схемы, которые соответствуют двум крайним точкам контакта клапана с отверстием (рис. 2).

Имеем две размерные цепи, соответствующие двум схемам замыкания: $O_k K_1$; $K_1 O_d$; $O_d O_k$ (рис. 2, а) и $O_d K_2$; $K_2 O_k$; $O_k O_d$ (рис. 2, б), в которых замыкающим звеном является величина d .

Из схемы, представленной на рис. 2, а, видно, что

$$d = O_d - O_k,$$

где $O_d = R_d \cos \varphi$, $\varphi = \arcsin(OK_1/R_d)$; $O_k = \sqrt{R_o^2 - OK_1^2}$; $OK_1 = R_1$.

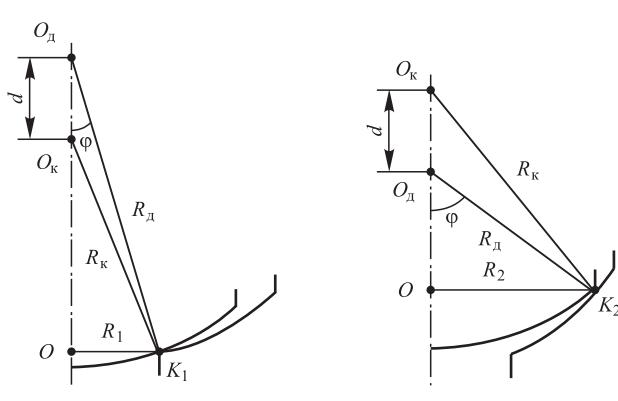


Рис. 2. Схемы, соответствующие точкам контакта K_1 (а) и K_2 (б)

Таким образом, имеем

$$d = R_d \cos \varphi - \sqrt{R_k^2 - R_1^2}. \quad (1)$$

Из схемы, представленной на рис. 2, б, видно, что

$$d = O_d - O_k,$$

где $O_d = R_d \cos \varphi$, $\varphi = \arcsin(OK_2/R_d)$; $O_k = \sqrt{R_k^2 - OK_2^2}$; $OK_2 = R_2$.

Таким образом,

$$d = \sqrt{R_k^2 - R_2^2} - R_d \cos \varphi. \quad (2)$$

Введем следующие переменные:

$$R = \begin{cases} R_1, & \text{если } R_k \leq R_d; \\ R_2, & \text{если } R_k > R_d; \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{если } R_k \leq R_d; \\ -1, & \text{если } R_k > R_d. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда формулы (1) и (2) могут быть объединены в систему

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin(R/R_d); \\ d = \alpha \left(R_d \cos \varphi - \sqrt{R_k^2 - R^2} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Формулы (5) представляют собой выражения для замыкающего звена двух разных размерных цепей, определяемых заданной сборочной единицей (см. рис. 1). С помощью арифметических и элементарных функций языка ПЛОГ [2] эти формулы могут быть описаны и введены в программу расчета размерных цепей.

Для описания переменных в (3) и (4) в языке ПЛОГ имеется оператор УСЛО, структура которого имеет вид

УСЛО *A B C U D E*.

Данный оператор выполняет следующие действия: $A = B$, если $C U D$, иначе $A = E$, где U означает математический знак сравнения ($<$, \leq , $=$, $>$, \geq , \neq).

Для приведенной на рис. 1 сборки выражения (3), (4) с использованием оператора УСЛО запишутся так:

УСЛО $\alpha \ 1 \ R_k < R_o - 1; \alpha = 1;$
если $R_k < R_o$, иначе $\alpha = -1$;

УСЛО $R \ R_1 \ R_k < R_o \ R_2; \ R = R_1;$
если $R_k < R_o$, иначе $R = R_2$.



Алгоритмическое решение

Суть алгоритмического решения поставленной задачи сводится к последовательности геометрических построений, в результате выполнения которых находится искомое замыкающее звено размерной цепи. При этом, так же как и при аналитическом решении, для определения реальной точки контакта используется оператор УСЛО языка ПЛОГ.

Алгоритм нахождения искомой величины d следующий (рис. 3).

Шаг 1. С помощью выражения (3) вычисляем величину R .

Шаг 2. Принимаем точку O_d за начало прямоугольной системы координат.

Шаг 3. От точки O_d под углом 0 откладываем величину R ; получаем точку K .

Шаг 4. Находим точку пересечения луча, проходящего через точку K под углом 270° , с окружностью с центром в точке O_d и радиусом R_d (в этом операторе языка ПЛОГ из двух точек пересечения, лежащих на луче, выбирается вторая по направлению луча); получаем точку K_1 (см. рис. 2, а) или K_2 (см. рис. 2, б).

Шаг 5. Находим точку пересечения луча, проходящего через точку O_d , по углом 90° , с окружностью с центром в точке K_1 (рис. 3, а) или в точке K_2 (рис. 3, б) и радиусом R_d ; получаем точку O_k .

Шаг 6. Искомую величину d определяем как расстояние между точками O_d и O_k .

Отметим, что для каждой сборки может быть несколько алгоритмических решений. Здесь рассмотрено одно из них.

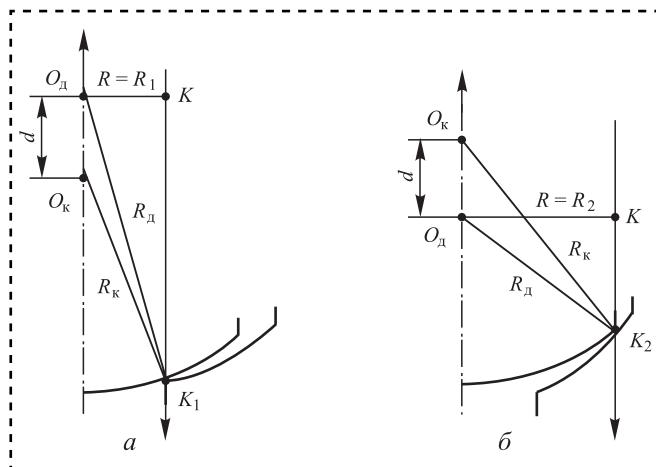


Рис. 3. Схемы алгоритмического решения, соответствующие точкам K_1 (а) и K_2 (б)

Решение с помощью виртуальной модели сборки

Виртуальная модель сборки формируется методом стыковки функционально-геометрических моделей деталей, входящих в нее. Метод стыковки базируется на определении взаимного положения объектов при их поступательном перемещении в плоскости [3].

Функционально-геометрическая модель представляет собой реализацию функциональной связи между параметрами-размерами объекта с его геометрией. Эта связь описывается на языке ПЛОГ.

Рассмотрим процесс формирования виртуальной модели сборки, представленной на рис. 1. Внесем некоторые упрощения в детали заданной сборки: будем рассматривать только те части деталей, которыми они соприкасаются (рис. 4).

Исходные данные для расчета размерных цепей с помощью виртуальной модели сборки такие:

описание деталей виртуальной модели сборки;

описание процесса соединения деталей в сборку;

вычисление искомого расстояния.

Описание каждой детали виртуальной модели сборки будет состоять из блока описания характерных точек контура детали и последовательности соединения элементов контура (характерными точками являются точки соединения элементов контура — отрезков прямых и дуг окружностей — и центров дуг).

Деталь с отверстием (рис. 4, а). Ее функционально-геометрическая модель будет содержать следующие геометрические построения:

точку 1 принимаем за начало координат;

от точки 1 под нулевым углом откладываем размер R_1 ; получаем точку 2;

от точки 1 под нулевым углом откладываем размер R_2 ; получаем точку 3;

находим точку пересечения луча, проходящего через точку 1 под углом, равным 90° , с окружностью с центром в точке 2 и радиусом R_d ; получаем точку 4.

Шаг 5. Находим точку пересечения луча, проходящего через точку 3 под углом, равным

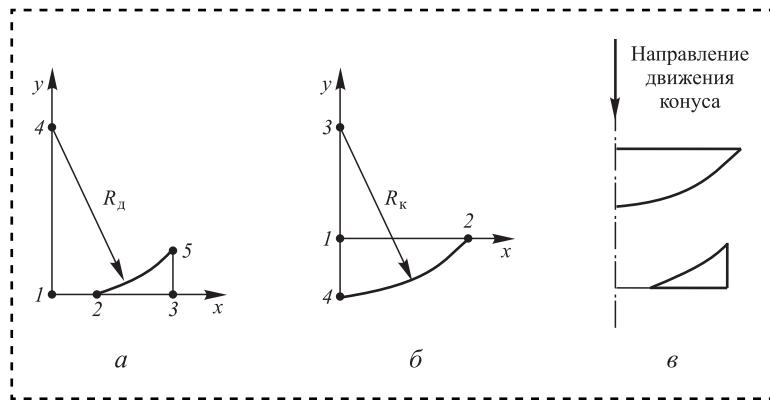


Рис. 4. Формирование виртуальной модели сборки:
а — деталь с отверстием; б — деталь "клапан"; в — сборка

270°, с окружностью с центром в точке 4 и радиусом R_d ; получаем точку 5.

Контур виртуальной модели детали с отверстием будет состоять из следующей последовательности соединенных между собой элементов:

точка 2 соединяется с точкой 3 прямой;

точка 3 соединяется с точкой 5 прямой;

точка 5 соединяется с точкой 2 дугой с центром в точке 4 и радиусом R_d .

Деталь "клапан" (рис. 4, б). Ее функционально-геометрическая модель будет содержать следующие геометрические построения:

точку 1 принимаем за начало координат;

от точки 1 под нулевым углом откладываем размер R_k ; получаем точку 2;

находим точку пересечения луча, проходящего через точку 2 под углом, равным 90°, с окружностью с центром в точке 2 и радиусом R_k ; получаем точку 3;

от точки 1 под углом, равным 270°, откладываем размер R_k ; получаем точку 4.

Контур виртуальной модели клапана будет состоять из следующей последовательности соединенных между собой элементов:

точка 1 соединяется с точкой 2 прямой;

точка 2 соединяется с точкой 4 дугой с центром в точке 3 и радиусом R_k ;

точка 4 соединяется с точкой 1 прямой.

Для получения виртуальной сборки (рис. 4, в) опустим модель клапана на модель детали с отверстием в соответствии с рис. 1. В результате получим виртуальную модель заданной сборочной единицы и найдем искомое замыкающее звено d как расстояние между точкой 4 детали с отверстием и точкой 3 клапана.

Выводы

Аналитическое решение, заключающееся в выводе соотношений, учитывающих изменение схемы замыкания в сборке, — процесс не всегда простой. При этом в формулах могут содержаться ошибки. Кроме того, рассмотренный пример сборки не является сложным. В реальных сборках может быть значительно больше двух размерных цепей, имеющих изменяющиеся схемы замыкания, и для каждой из них требуется вывод соответствующих выражений.

Геометрические построения, применяемые при алгоритмическом решении, не всегда очевидны и однозначны: для каждой сборки может быть несколько алгоритмических решений.

Опыт автора по расчету размерных цепей с помощью программ РРЦ и СБОРКА показывает, что наиболее надежные результаты дает подход с использованием виртуальной сборки. Такой подход не требует вывода необходимых зависимостей и построения алгоритма решения. При использовании виртуальной сборки необходимо получить функционально-геометрические модели деталей и указать, как они соединяются. Кроме простоты подготовки исходных данных преимуществом виртуальной сборки является визуальное представление результатастыковки деталей при формировании сборки.

Заметим, что результаты расчетов при использовании всех трех методов совпадают. Это говорит о том, что исходные данные сформированы верно.

Библиографический список

1. Аввакумов В.Д. Расчет сборочных размерных цепей на ЭВМ // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 10. С. 9–11.
2. Аввакумов В.Д. Функциональная размерная параметризация в САПР // Изв. Тульского государственного университета. Сер. Машиностроение. Вып. 6 (специальный). Сб. избранных трудов конференции "Автоматизация и информатизация в машиностроении 2000". Тула: Изд. ТулГУ, 2000. С. 22–28.
3. Аввакумов В.Д. Определение взаимного положения объектов при их перемещении в плоскости // Информационные технологии. 2006. № 10. С. 52–58.



УДК 621.3.049.75

А.М. Медведев, д-р техн. наук, А.М. Сокольский(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))
E-mail: sokol347@gmail.com

Технологическое обеспечение надежности электрической изоляции электронных сборок авионики

Факторы внешнего атмосферного воздействия, такие как влажность, температура, конденсат, соляной туман, агрессивные вещества или их сочетание, являются причиной возникновения процесса коррозии электронных сборок авионики. Коррозия может ускоряться из-за наличия технологических загрязнений, возникающих в процессе производства. Предлагаются меры защиты узлов и блоков авионики от коррозии путем выбора типа и способа нанесения защитных покрытий для увеличения срока службы и надежности электронных сборок.

External factors of atmospheric effects such as humidity, temperature, condensation, salt fog, aggressive substances or their combination are the reason the corrosion process of avionics electronic assemblies. Corrosion may accelerate due to the presence of contaminants, emerging technology in the production process. The article proposes measures protect assemblies and avionics units from corrosion, by choosing the type and the way of application of protective coatings for durability and reliability of electronic assemblies.

Ключевые слова: авионика, коррозия, электрическая изоляция, влагозащитные покрытия.

Keywords: avionics, corrosion, electrical insulation, waterproof coating.

Так называемые влагозащитные (конформные) покрытия не могут идеально защитить поверхность электронных сборок, поскольку они сами по себе влагопроницаемы. Кроме того, в них неизбежно присутствуют пустоты, пузыри и трещины, которые становятся очагами начала коррозии.

Жидкие в начальной стадии (до отверждения) покрытия стекают с острых кромок печатных проводников и выводов электронных компонентов, лишая их влагозащиты. В связи

с этим требуется разработка дополнительных мер технологического обеспечения надежности авионики, для которой свойственно воздействие повышенного уровня влажности в процессе эксплуатации. Этому сопутствует увеличивающееся загрязнение атмосферы промышленных городов и глобальное потепление, что так или иначе связано с увеличивающимся содержанием атмосферной влаги.

Проблема защиты электронной аппаратуры от коррозии обостряется растущей тенденцией в сторону миниатюризации электронных сборок, что влечет за собой ослабление элементов электроизоляционных конструкций за счет уменьшения их размеров.

Вместе с тем необходима разработка безотказных электронных сборок авионики, поскольку они работают в агрессивных условиях эксплуатации в широком диапазоне климатических воздействий.

Основной традиционный способ предотвращения коррозионных процессов — нанесение влагозащитных покрытий, выполняющих роль барьера от проникновения химически агрессивных компонентов в электроизоляционные конструкции сборок. Существуют много типов влагозащитных покрытий, которые выбирают исходя из их индивидуальных свойств (см. таблицу).

Двухкомпонентные покрытия на основе растворов наносятся в жидком виде и превращаются в твердые защитные покрытия за счет испарения растворителя. Выходящие из покрытия пары растворителя оставляют в высыхающей пленке тонкие каналы, которые потом будут не только пропускать влагу, но и служить местом конденсации влаги при относительной влажности гораздо меньшей, чем 100 %.

Однокомпонентные покрытия получаются за счет отверждения мономеров, для чего ис-

Достоинства и недостатки некоторых типов покрытий

Тип покрытия	Основные преимущества	Основные недостатки
Акриловое на основе растворителя	Простота использования Быстрая сушка Хорошая защита общего назначения Хорошая технологичность	Не обладает высокой адгезией Выбросы летучих органических соединений
Уретановое на основе растворителя	Простота использования Хорошая химическая стойкость	Выбросы летучих органических соединений
Силиконовое	Простота использования Морозостойкость Несмачиваемость водой Слабый запах	Влагопроницаемость Плохая защита от коррозионных газов Выбросы летучих органических соединений
УФ-отверждаемые (на основе эпоксидных смол, акрилаты и др.)	Низкое содержание летучих органических соединений Быстрое отверждение	Сложный процесс Сложная технология

пользуется отвердитель. Для ряда твердеющих покрытий отвердителем могут служить компоненты внешней среды. Например, для олифы отвердителем служит кислород воздуха, для уретанов — влага атмосферы.

И двухкомпонентные, и однокомпонентные покрытия обладают определенной влагопроницаемостью и не создают достаточно плотного барьера, препятствующего проникновению влаги к поверхности электроизоляционной конструкции сборок.

Появилась относительно новая система образования плотных влагозащитных пленок, в которых мономерные газы смешиваются в вакууме. Они полимеризуются там и оседают на поверхности печатной платы в качестве защитной пленки. Эта система осаждает полипарацсиллен (сокращенно парилен) — принципиально новое покрытие, которое благодаря влагонепроницаемости получает большие преимущества в использовании в целях влагозащиты.

Для оценки свойств влагозащитных покрытий проведено тестирование ряда конформных покрытий в различных температурно-влажностных режимах. Заодно были учтены результаты исследований образцов покрытий, которые пришли в негодность в реальных условиях неблагоприятной окружающей среды.

В процессе испытаний учитывалось, что коррозия — это сложный электрохимический процесс с множеством возможных механизмов. Однако в подавляющем большинстве случаев есть три необходимых условия, которые должны иметь место для ее возникновения (рис. 1):

1) присутствие пары электрохимически разнородных металлов (часто встречаются пары, например, золота и олова, серебра и никеля) или создание разности потенциалов между однородными металлами (в данном случае печатными проводниками);

2) наличие диссоциированных на ионы технологических загрязнений (обычно галогенидов, гидроксидов, омыленных остатков канифоли и т. п.);

3) наличие по крайней мере монослоя конденсированной воды, в которой растворяются иногенные технологические загрязнения и/или соли, содержащиеся в атмосферных загрязнениях, в результате чего получается раствор электролита.

В целях предотвращения коррозии необходимо устранить одно из этих условий.



Рис. 1. Необходимые условия для коррозии печатных плат

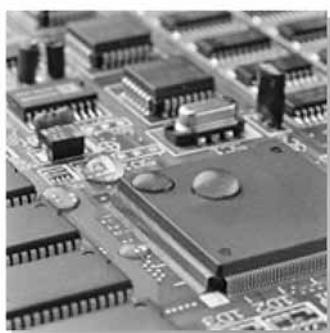
*a)**б)*

Рис. 2. Остатки загрязнений от пайки и других процессов сборки (а) и конформное покрытие, защищающее электронику от коррозии (б)

Выбор металлов ограничен теми металлами, которые используются в припое и печатных проводниках. Однако всегда найдутся участки, имеющие разность потенциалов в электрической цепи. Очистка поверхности печатной платы может удалить иногенные загрязнения, но не может предотвратить их повторное осаждение из окружающей среды в процессе эксплуатации (рис. 2, а).

Конформное покрытие (рис. 2, б) помогает предотвратить образование электролитических растворов, выступая в качестве барьера для влаги. Это покрытие должно обеспечить хорошую защиту от влаги и иметь хорошую адгезию к поверхности печатной платы, чтобы предотвратить отслаивание. В случае отслоения покрытия влага может сбрасывать в этот "карман" электролит с любыми существующими ионными загрязнениями. В связи с этим рекомендуется тщательная очистка печатных узлов перед нанесением конформного

покрытия, что позволяет ликвидировать две из трех предпосылок для коррозии.

Конформные покрытия — это тонкие полимерные пленки, которые покрывают и защищают галтели припоя, проводники, металлизированные объекты, а также электронные компоненты на печатных платах от коррозии в процессе эксплуатации в неблагоприятных условиях (высокая влажность, конденсация влаги, соляной туман, агрессивные газы и др.). Такие покрытия обладают собственными критериями эффективности, характерными для каждого из них. Однако у всех покрытий есть общее свойство — они действуют как барьер, предотвращающий осаждение конденсационной влаги и агрессивных веществ на электронные устройства.

Для максимального уровня защиты такие покрытия должны соответствовать следующим основным требованиям:

иметь высокую адгезию к поверхности электронного узла в очень сухих и/или очень влажных условиях, чтобы предотвратить отслаивание. Выполнение этого требования осложняется потенциально негативным влиянием на адгезию различных остатков технологических процессов производства печатных плат, "нечистых" технологий сборки, флюсов при нанесении и отверждении припоя в процессе пайки;

полностью покрывать металлические поверхности, для того чтобы эффективно защищить их от влаги, так как деформация, микропустоты в покрытии, трещины, пузыри, пересушенные зоны и т. д. будут служить очагами коррозии и после того, как коррозионный процесс начнется, он будет продолжаться и под защитным покрытием.

Таким образом, выбор "правильного" конформного покрытия — это лишь первый этап в процессе поиска защиты от коррозии. Пожалуй, большее значение имеет подготовка перед покрытием (например, очистка) и соблюдение режимов самого процесса.

Если процесс нанесения конформного покрытия не до конца продуман, то в большей или меньшей степени могут иметь место недоотверждение или пересушка покрытий, что влияет на характеристики материала, такие как поверхностное натяжение, тиксотропные свойства и время отверждения.



Большинство покрытий будет иметь тенденцию утонения на острых кромках компонентов и паяных соединений. Проявление этого дефекта может усиливаться вследствие длительного времени сушки и высокой текучести наносимого жидкого покрытия из-за долгого испарения растворителя. Кроме того, чрезвычайно сложно добиться подтекания покрытия под корпуса компонентов. Понимание и контроль этих процессов и их влияние на качество конформного покрытия является ключом к производству надежной авионики, работающей в агрессивных средах.

Таким образом, процессы нанесения конформных покрытий и качество управления этими процессами будут иметь наибольшее влияние на безаварийную работу авионики на

протяжении всего срока эксплуатации в экстремальных климатических условиях.

Вывод

Существующие конформные покрытия, способные выдерживать экстремальные условия эксплуатации, требуют тщательной оценки для удовлетворения всех требований технологического обеспечения надежности авионики.

Выбор материала конформного покрытия в сочетании с соответствующим технологическим процессом его нанесения дает возможность получить заданный уровень бездефектности покрытия для обеспечения достаточной надежности технических средств авионики.

СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 621.9.04

В.Ф. Безъязычный, д-р техн. наук, В.М. Федулов, канд. техн. наук
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
E-mail: technology@rgata.ru

Определение давления в прессовых соединениях с учетом материала контактируемых поверхностей деталей и условий их обработки*

Приведено обоснование выбора зависимостей для расчетного определения давления в зоне контакта поверхностей деталей при их сборке методом продольной запрессовки.

The article describes the selection of dependences for determination of pressure in the contact zone of the surfaces of the parts during assembling by means of method of longitudinal insertion.

Ключевые слова: сборка, прессовое соединение, давление, коэффициент трения, контактная жесткость.

Keywords: assembly, press connection, pressure, coefficient of friction, contact stiffness.

На этапе проектирования изделия задача по расчетному определению параметров качества соединений с натягом с учетом микротопографии контактных поверхностей и их технологических условий обработки имеет важное значение для последующей технологической подготовки производства и дальнейшей эксплуатации изделия. Незначительное отклонение в расчетах может привести к существенным затратам на ремонт в случае разрушения соединения. Масштабные отказы некачественных изделий делают продукцию предприятий неконкурентоспособной.

В целях обеспечения требуемых прочностных характеристик соединений с натягом при различных способах сборки на основе расчетного метода определения натяга, зависящего от параметров шероховатости контактных поверх-

ностей и их технологических условий обработки, должен учитываться комплекс факторов.

Соединения с натягом подвержены действию рабочих нагрузок, поэтому при проектировании задается величина осевой силы P_o или крутящего момента M_{kp} , которые должны обеспечивать соединение.

Давление в зоне контакта сопрягаемых поверхностей определяется по формулам

$$p = \frac{P_o}{\pi d f_{oc}}; \quad (1)$$

$$p = \frac{2M_{kp}}{\pi d^2 f_{kp}}, \quad (2)$$

где p — давление в соединении, МПа;

P_o — осевая сила нагружения, Н;

M_{kp} — крутящий момент, Нм;

d — номинальный диаметр сопрягаемых поверхностей, мм;

l — длина контакта соединяемых деталей, мм;

f_{oc}, f_{kp} — коэффициенты трения при кручении и осевом сдвиге соответственно.

Экспериментальному и теоретическому определению коэффициентов трения посвящено множество работ. Установлено, что коэффициенты варьируются в широких пределах в зависимости от физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, шероховатости поверхности, контактного давления и способа сборки соединений с натягом. Выбирать среднее значение коэффициентов трения из справочников при расчете давления в ответственных узлах нежелательно, так как возможна значительная погрешность.

Расчет коэффициентов трения в осевом и окружном направлениях в соединении целесообразно осуществлять по зависимостям,

* Исследования выполнялись в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (НИР 824).



учитывающим состояние поверхностного слоя деталей после обработки (по данным М.С. Дрозда, М.М. Матлина и др.):

$$f_{oc} = 0,218 \eta_r^{1/v} \left(\frac{HB}{p} \right)^{0,58}; \quad (3)$$

$$f_{kp} = 0,27 \eta_r^{1/v} \left(\frac{HB}{p} \right)^{0,58}, \quad (4)$$

где $\eta_r = A_r/A_a$ — относительная фактическая площадь контакта в цилиндрическом соединении;

A_r — фактическая площадь контакта, мм^2 ;

A_a — номинальная площадь контакта, мм^2 ;

v — параметр кривой аппроксимации опорной поверхности, зависящий от вида обработки;

HB — модуль твердости поверхности по шкале Бринелля;

p — среднее давление в цилиндрическом стыке, МПа.

Контакт поверхностей деталей машин является дискретным и осуществляется на малых площадях, сумма которых образует фактическую площадь контакта. Поэтому фактическую площадь контакта также необходимо рассчитывать.

Н.Б. Дёмкиным был предложен метод расчета характеристик контакта шероховатых поверхностей, основанный на модели, соответствующей реальной шероховатости поверхности. Согласно этой модели выражение для расчета фактической площади контакта при упругой деформации микровыступов имеет вид (по данным Н.Б. Дёмкина)

$$A_r = \left(\frac{2,35 A_c^{0,5v} b^{0,5v} IJ^{0,5} N}{2^{0,5v} K_3 R_{\max}^{0,5}} \right)^{\frac{2v}{2v+1}}, \quad (5)$$

где A_c — контурная площадь контакта, мм^2 ;

N — нормальная сила нагрузки, Н;

b — параметр кривой аппроксимации опорной поверхности;

R_{\max} — максимальная высота неровностей, мкм;

K_3 — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала детали и параметров, характеризующих микронеровность. Коэффициент K_3 рекомендуется определять по формуле

$$K_3 = \frac{1,4ERz^{0,5}}{1,4ERz^{0,5} + \pi c \sigma_t (1 - \mu^2) (r_{\text{пр}} r_{\text{поп}})^{0,25}}, \quad (6)$$

где $r_{\text{пр}}$, $r_{\text{поп}}$ — радиусы скругления вершин неровностей в продольном и поперечном направлениях соответственно, мкм;

Rz — высота неровностей профиля контактируемой поверхности, мкм;

E и μ — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала детали;

σ_t — предел текучести материала детали, МПа;

c — коэффициент, характеризующий наличие упрочнения поверхности;

J — приведенный радиус скругления вершин неровностей, определяемый по формуле

$$J = \frac{r_{\text{пр}} r_{\text{поп}}}{r_{\text{пр}} + r_{\text{поп}}}; \quad (7)$$

I — величина, определяемая из соотношения

$$I = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (8)$$

где μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей; E_1 и E_2 — модули упругости материалов деталей, МПа.

Параметры кривой аппроксимации опорной поверхности v и b в зависимости от методов обработки и профиля шероховатости определяют по формулам

$$v = 2t_m \left(\frac{Rp}{Ra} \right)^{-1}; \quad (9)$$

$$b = t_m \left(\frac{R_{\max}}{Rp} \right)^v, \quad (10)$$

где Rp — расстояние от линии выступов неровностей до средней линии, мкм; Ra — среднее арифметическое отклонение профиля неровностей, мкм; t_m — относительная длина опорной поверхности (при лезвийной обработке $t_m \approx 0,5$).

Наиболее типичным случаем является контакт, при котором имеют место упругая и пластическая деформации выступов неровностей одновременно.

При упругопластическом контакте расчет площади контакта производится по формуле



$$A_r = \frac{N}{c\sigma_t} + \frac{b^{1/v} A_c^{1/v} \alpha_k}{2R_{\max}} \left(\frac{N}{c\sigma_t} \right)^{\frac{v-1}{v}}, \quad (11)$$

где c — коэффициент (для наклепанного материала $c \approx 3$); α_k — критическая величина сближения поверхностей, мкм; σ_t — предел текучести материала, МПа. В первом приближении можно считать $c\sigma_t \approx HB$.

Контурная площадь контакта A_c , входящая в выражения (5) и (11), определяется по следующей зависимости:

$$A_c = \left(A_a^v N \frac{b^{v-1}}{HB} \right)^{\frac{1}{1+v}}. \quad (12)$$

Величину контактного сближения, которая зависит от параметров качества контактирующих поверхностей и физико-механических свойств материалов контактирующих деталей, необходимо определять как сумму величин упругой и пластической деформаций, определяемых с учетом технологических условий обработки.

Для расчета величины упругой деформации при произвольном расположении выступов микронеровностей ($0 < \omega < 90^\circ$) контактирующих цилиндрических поверхностей, обработанных точением, на основе выражений для определения контактной жесткости деталей [1] была получена зависимость

$$y_{\text{упр}} = k(e)c\sigma_t \left(\frac{S_m(1-\mu^2)}{95,6 Rz_1^{1,02}} \right) \left(\frac{\Delta p \pi l}{C_1 + C_2} \right) \times \left(\frac{0,25\pi S_{m1} S_{m2}}{18,7 \cdot 10^3 Rz_1^{1,02} Rz_2^{1,02}} \right)^{-0,5 \sin(\pi/2 - \omega)}. \quad (13)$$

Величина эксцентриситета эллипсной площадки e будет определяться по формуле

$$e = \sqrt{1 - \left[\frac{1,59 S_m Rz_{\text{пп}}^{0,26}}{S_{m\text{пп}} Rz^{0,2}} \left(\frac{\Delta p \pi l E}{c\sigma_t (C_1 + C_2) \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-5} \pi S_m S_{m\text{пп}}}{Rz^{1,02} Rz_{\text{пп}}^{0,26}} \right)^{0,8}} \right)^{0,75} \right]^2}. \quad (14)$$

В формулах (13), (14) приняты следующие обозначения:

$k(e)$ — эллиптический интеграл первого рода;

$c\sigma_t$ — напряжение, приводящее в пластическое состояние выступ, МПа;

E — модуль упругости материала детали, МПа;

μ — коэффициент Пуассона материала детали;

p — давление в соединении, МПа;

l — длина контакта соединяемых деталей, мм;

Rz_1 , Rz_2 — высота неровностей профиля контактирующих поверхностей в поперечном направлении, мм;

C_1 , C_2 — коэффициенты, зависящие от геометрических соотношений сопрягаемых поверхностей;

S_m и $S_{m\text{пп}}$ — средний шаг неровностей на поверхности в поперечном и продольном направлениях соответственно, мм;

Rz и $Rz_{\text{пп}}$ — высота неровностей профиля в поперечном и продольном направлениях соответственно, мм;

Δ — величина натяга в сопряжении.

Влияние технологических условий обработки контактирующих поверхностей на пластические контактные перемещения может быть определено, как и для случая упругого контакта, на основании зависимостей, устанавливающих взаимосвязь высоты микронеровностей Rz с технологическими условиями обработки поверхности. Расчетные зависимости для определения пластических контактных перемещений поверхностей в цилиндрическом соединении с натягом при обработке поверхностей деталей точением с учетом зависимостей, приведенных в работе [1], при

$\varphi < \arcsin S/(2r)$ и $\varphi_1 < \arcsin S/(2r)$ имеют следующий вид:



$$y_{\text{пл}} = 0,546 \left(\frac{\sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \left[S_\varphi - r \cdot 10^{-3} \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] \right)^{1,02} \times \frac{\left(r_1 + r_2 + \sin \omega \sqrt{r_{\text{пл}} r_{\text{пл2}}} + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega \right) \sqrt{r_{\text{пл1}} r_{\text{пл2}}} \right) K}{r_2} \times \\ \times \frac{\nu^{0,28} r^{3,58^{1,7}} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}{7,08 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S_\varphi^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta^{0,35}} \frac{100 N_1 N_2 k_5}{t_m} \left(\frac{\Delta p l E^2}{2 r_2 \sigma_{T2} (C_1 + C_2)} \right)^m (c k_3)^{1-m} \left[\frac{1}{v} \right]. \quad (15)$$

В формуле (15) приняты следующие условные обозначения:

r_1 , r_2 — приведенные радиусы закругления вершины единичной микронеровности, мм; $r_{\text{пл}}$, $r_{\text{пл2}}$ — радиусы закругления вершины единичной микронеровности в продольном направлении, мм; $r_{\text{пл1}}$, $r_{\text{пл2}}$ — радиусы закругления вершины единичной микронеровности в поперечном направлении, мм; N_1 , N_2 — число вершин микронеровностей, находящихся в контакте; v — параметр аппроксимации кривой опорной поверхности шероховатости; m — показатель степени, определяемый как сумма параметров кривых аппроксимации опорных поверхностей; k_5 — коэффициент, полученный в результате численного решения исходного интегрального уравнения для отыскания фактической площади контакта; k_3 — коэффициент, учитывающий изменение величины сближения контактирующих поверхностей при деформации микронеровностей за счет осадки основания; K — коэффициент, зависящий от вида обрабатываемого материала; t_m — относительная длина опорной поверхности на уровне средней линии; δ — длина фаски износа по задней поверхности инструмента, мм; ρ_1 — радиус округления режущей кромки резца, мм; τ_p — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа; α и γ — задний и передний углы резца, °; v — скорость резания, м/с; a — температуропроводность материала

обрабатываемой детали, $\text{м}^2/\text{с}$; S_φ — значение подачи, определяемое как функция толщины среза [2]; φ , φ_1 — соответственно главный и вспомогательный углы резца в плане, °; t — глубина резания, м; r — радиус при вершине резца в плане, м; ω — угол между следами обработки на контактируемых поверхностях, °.

Вывод

Обусловливающими параметрами прочности прессовых соединений являются коэффициент трения материалов контактируемых поверхностей, шероховатость поверхностей контактируемых деталей, фактическая площадь контакта сопрягаемых поверхностей. Предложенные зависимости для расчетного определения коэффициентов трения, параметров шероховатости поверхностей и площади их контакта позволяют производить расчет давления и нагрузочной способности соединения с натягом с учетом условий контакта шероховатых поверхностей и влияния технологических факторов обработки поверхностей деталей.

Библиографический список

1. Дмитриева М.Н. Обеспечение контактной жесткости деталей машин на основе управления технологическими условиями обработки: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск: Рыбинский государственный авиационный технический ун-т имени П.А. Соловьева, 2010.

2. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.

ООО "Издательство "Инновационное Машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;

редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс 8 (499) 268-48-97.

Технический редактор Патрушев Е.М. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 08.09.2015. Подписано в печать 22.10.2015. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: www.aov.ru

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.