

Проектирование модульных инструментальных наладок с заданными точностью и жесткостью

А. Р. Маслов, Е. Г. Тивирев

Дано описание методики создания модульных инструментальных наладок с заданными показателями точности и жесткости для обработки отверстий в корпусных деталях. Приведены примеры проверочных расчетов.

Ключевые слова:

проектирование, модульные инструментальные наладки, точность, жесткость

УДК 621.9.02 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.82.86

Модульные инструментальные наладки (МИН) занимают значительное место в широком спектре применяемых и разрабатываемых конструкций технологической оснастки [1, 2].

Важнейшим требованием к МИН металлорежущих станков с ЧПУ является обеспечение достаточной результирующей точности и жесткости [3–5]. В связи с тем, что МИН являются элементами технологической

системы (ТС), существует связь точности и жесткости МИН с качеством обработки деталей. В табл. 1 приведены примеры допустимых биений режущих кромок осевых инструментов, установленных на металлорежущем станке в составе МИН.

Упругие деформации ТС, возникающие, например, в процессе обработки отверстий, также оказывают существенное влияние на точность их размеров, формы и взаимного расположения.

Допустимая податливость МИН в зависимости от закрепляемого осевого режущего инструмента приведена в табл. 2.

Таблица 1. Допустимое биение режущих кромок осевых инструментов

Инструмент		Допустимое биение, мм
Сверла	С цилиндрическим хвостовиком диаметром 6–18 мм	0,056
	С коническим хвостовиком диаметром 18–30 мм	0,071
Зенкеры и развертки	Диаметром до 50 мм	0,062
	Диаметром до 120 мм	0,081
Расточные оправки	Для получистовой обработки отверстий диаметром 22–180 мм (биение оправки)	0,030
	Для чистовой обработки отверстий (биение оправки) диаметром: <ul style="list-style-type: none"> • 25–80 мм, • 80–180 мм 	0,005 0,010

Таблица 2. Допустимая податливость МИН в зависимости от закрепляемого осевого режущего инструмента

Инструмент	Диаметр, мм	Допустимая податливость, мкм / кН
Патроны и втулки для сверл	6–18	0,292
	18–30	0,186
Расточные оправки для получистовой обработки отверстий	20–80	0,153
	80–180	0,110
Расточные оправки для чистовой обработки отверстий	40–80	0,115
	80–180	0,073

Таблица 3. Характеристики распределения производственного допуска при обработке присоединительных поверхностей МИН

Способ получения поверхности	Вид поверхности	K_i
Наружное шлифование в центрах	Конус Морзе	1,17
	Конус:	
	• 7:24,	1,51
	• 1:5	1,37
	Цилиндрическая	1,09
Внутреннее шлифование	Конус Морзе	1,17
	Конус:	
	• 7:24,	1,17
	• 1:5	1,21
	Цилиндрическая	1,09
Бесцентровое шлифование	Конус Морзе	1,03

Данные о предельно допустимых точности и жесткости служат критериями при создании МИН с заданной точностью и жесткостью, для оценки качества этих конструкций и при определении технических требований к их элементам.

Так как присоединительные поверхности модулей МИН изготавливаются в условиях мелкосерийного производства важно знать, как распределяются производственные допуски на размеры этих поверхностей, которые можно характеризовать коэффициентом относительного рассеяния K_i (табл. 3).

Биение режущей части режущих вставок МИН в системе координат металлорежущего станка рассматривается как замыкающее звено в сложной размерной цепи, образованной отклонениями линейных и угловых размеров элементов технологической системы. Решение уравнения этой цепи теоретико-вероятностным методом позволяет учесть законы распределения отклонений линейных и угловых размеров поверхностей модулей МИН при их изготовлении и случайный характер составляющих погрешностей,

Таблица 4. Значения биения $2e$ контрольной оправки на вылете 100 мм в зависимости от степени точности конусов, мкм

Конус	Степень точности конусов							
	AT3	AT4	AT5	AT6	AT7	AT8	AT9	AT10
7:24	1	1,2	1,3	2,6	5,0	12,0	–	–
1:20 (конус Морзе)	–	–	9,5	10,5	15,0	18,0	20,0	24,5
1:5 (цанги)	–	–	8,0	9,0	10,0	12,0	13,0	17,0

Таблица 5. Значение перекоса e оси инструмента на вылете 100 мм для цилиндрических соединений диаметром 30–50 мм

Квалитет точности (СТ СЭВ 144–75)	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9
e , мм	1,0	1,6	3,2	4,3	6,0	12,0

таких как смещения и перекосы осей при сборке компонентов МИН из модулей.

Угловые ошибки составляющих звеньев (перекосы осей) и векторные ошибки (параллельное смещение осей) суммируются путем приведения перекосов осей к векторному виду в плоскости замыкающего звена (биения режущей части) через передаточные отношения:

$$\bar{e}_\Sigma = \frac{1}{K_\Sigma} \sqrt{\sum_i^n A_i^2 K_i^2 e_i^2}, \quad (1)$$

где \bar{e}_Σ – половина допустимой величины биения замыкающего звена; K_Σ – коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена; e_i – величина биения i -го звена; A_i – передаточное отношение; K_i – коэффициент относительного рассеяния i -го звена; n – число звеньев в цепи.

Характеристика замыкающего звена:

$$K_\Sigma = 1 + \frac{0,55}{\sum_{i=1}^n e_i} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 e_i^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \right). \quad (2)$$

Зависимости точности центрирования конусов, измеряемой как биение $2e$ контрольной оправки от величины погрешности их изготовления, приведены в табл. 4.

Значение перекоса e оси инструмента на вылете 100 мм для цилиндрических соединений диаметром 30–50 мм с боковым зажимом винтами в зависимости от погрешности изготовления приведены в табл. 5.

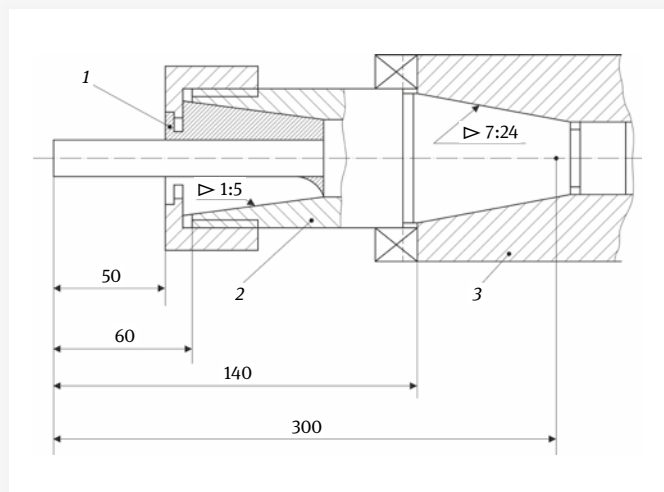


Рис. 1. Цанговый патрон с закрепленной оправкой: 1 – цанга; 2 – корпус патрона; 3 – шпиндель станка

В качестве примера на рис. 1 приведен расчет биения $2e_{\Sigma}$ оправки, закрепленной в цанговом патроне.

В примере приняты следующие параметры модулей цангового патрона.

1. Биение конического отверстия шпинделя станка с ЧПУ класса точности Н у торца составляет 0,008 мм, на вылете 300 мм – 0,010 мм, то есть допустимый перекос равен 0,001 мм на длине 300 мм.
2. Погрешность изготовления конических поверхностей с конусностью 7:24 принимаем по АТ7 (ГОСТ 55144-2012 и ГОСТ 25307-82), что соответствует максимальной

разности углов внутреннего и наружного конусов 16" и значению перекоса в коническом соединении 0,0025 мм на вылете 100 мм (см. табл. 4).

3. Максимальное биение конического отверстия корпуса цангового патрона относительно оси конуса хвостовика не более 0,010 мм.
4. Погрешность изготовления конических поверхностей цанги и корпуса цангового патрона с конусностью 1:5 принимаем по степени точности АТ7. Максимальное биение цилиндрического отверстия цанги относительно наружного конуса цанги не более 0,010 мм.

В табл. 6 приведены данные для расчета точности крепления инструмента в цанговом патроне.

По данным табл. 6 и по формуле (2) определяется значение $K_{\Sigma}=1,04$. В качестве скалярной величины принимается биение конического отверстия корпуса цангового патрона. Биение оправки $2e_{\Sigma}$, рассчитанное по формуле (1), равно:

$$2e_{\Sigma} = \frac{2}{1,04} \sqrt{\left[\begin{aligned} & (1 \cdot 1,14 \cdot 5)^2 + (1 \cdot 0,63 \cdot 1,1)^2 + (4 \cdot 1 \cdot 1,17)^2 + \\ & + (2,5 \cdot 1,51 \cdot 1,4)^2 + (6 \cdot 1,37 \cdot 0,6)^2 + (5 \cdot 1,09 \cdot 1)^2 \end{aligned} \right]} = 22,4 \text{ мкм.}$$

То есть расчетная величина биения $2e_{\Sigma}$ цангового патрона при указанных параметрах его модулей составляет 0,022 мм на вылете 50 мм от торца патрона, что удовлетворяет требованиям для установки и закрепления сверл, зенкеров и разверток с цилиндрическим хвостовиком диаметром 6–18 мм.

Как составная часть технологической системы компоновка МИН испытывает деформацию двух видов: тела

Таблица 6. Данные для расчета величины биения инструмента, закрепленного в цанговом патроне

Биение	Ошибка	e_i	K_i	A_i
Шпинделя от перекоса оси	Угловая	$\frac{1 \text{ мкм}}{300 \text{ мм}}$	1,1	0,63
Конического отверстия шпинделя	Векторная	4 мкм	1,17	1
Корпуса цангового патрона от перекоса при установке конуса с конусностью 7:24	Угловая	$\frac{2,5 \text{ мкм}}{100 \text{ мм}}$	1,51	1,4
Оси конического отверстия в корпусе цангового патрона относительно оси конического хвостовика с конусностью 7:24	Векторная	5 мкм	1,14	1
Оси цанги от перекоса при установке в корпусе конусностью 1:5	Угловая	$\frac{0,6 \text{ мкм}}{100 \text{ мм}}$	1,37	0,6
Оси цилиндрического отверстия в цанге относительно оси наружной конической поверхности цанги	Векторная	5 мкм	1,09	1

модулей (изгиб, скручивание) и их поверхностных слоев, которыми они контактируют в местах соединения. Деформациям первого вида противостоит объемная жесткость, а второго – контактная жесткость. Это два принципиально разных вида жесткости, методы определения которых совершенно различны.

Объемная жесткость (податливость) определяется исходя из действия составляющих сил резания, геометрических размеров и свойств материалов, из которых изготовлены модули МИН.

Контактная жесткость (податливость) в стыках модулей также определяет деформации в местах приложения сил резания.

Величина контактных деформаций зависит от многих факторов: величины и вида нагружения, величины и распределения давлений, величин зазоров, точности обработки и размеров сопрягаемых поверхностей. Наклон в стыках деталей модулей МИН вызывает существенные перемещения в точке приложения силы, в ряде случаев соизмеримые и даже бóльшие, чем прогиб самих модулей. Упругое контактное перемещение в стыке двух поверхностей соединяемых модулей под действием силы P , приложенной на некотором удалении от конца стыка, определяется выражением:

$$y = \delta_0 + \theta l, \quad (3)$$

где δ_0 – смещение на краю стыка в результате контактной податливости, мм; θ – угол поворота в стыке, мкм/мм.

При хорошем качестве изготовления присоединительных поверхностей модулей МИН величиной δ_0 в формуле (3) можно пренебречь и рассчитывать перемещения только по углу поворота.

Перемещение y определяем как суммарное перемещение в точке приложения нагружающей силы P с учетом

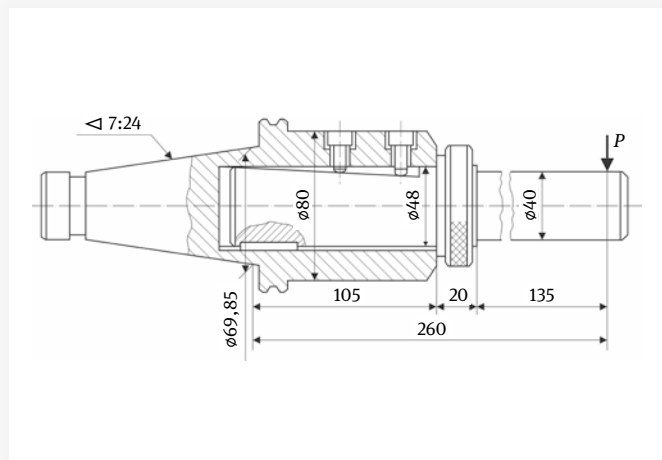


Рис. 2. Сборная расточная оправка

Таблица 7. Податливость θ_1/M в конусах

Конус конусностью 7:24	Степень точности конусов, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$			
	AT5	AT6	AT7	AT8
40	0,00121	0,00133	0,00142	0,00191
50	0,00020	0,00027	0,00035	–

Таблица 8. Податливость θ_2/M в цилиндрических соединениях с боковым зажимом винтами

Диаметр соединения, мм	Зазор в соединении, мм	θ_2 в направлении силы затяжки винтов, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$	θ_2 перпендикулярно к силе затяжки винтов, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$
36	0,014	0,0032	0,0060
	0,037	0,0041	0,0079
48	0,014	0,0010	0,0014
	0,026	0,0012	0,0021
	0,048	0,0016	0,0062

Таблица 9. Податливость θ_3/M в конусах Морзе

Конус Морзе	Исполнение	Степень точности конуса, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$		
		AT7	AT8	AT9
1	С лапкой	0,2012	0,2097	0,2110
2	С резьбой	0,0433	0,0436	0,0462
	С лапкой	0,0477	0,0476	0,0499
3	С резьбой	0,0118	0,0124	0,0136
	С лапкой	0,0124	0,0141	0,0157
4	С резьбой	0,0034	0,0038	0,0046
	С лапкой	0,0046	0,0052	0,0055

Таблица 10. Податливость θ_4/M в цанговом зажиме

Диаметр закрепляемых хвостовиков, мм	Диаметр хвостовика, мм	θ_4 для стыка цанга – корпус патрона, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$	θ_4 для стыка хвостовик инструмента – цанга – корпус патрона, $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$
20–40	40	0,0010	0,0026
	20		0,0029
3–25	20	0,0019	0,0038
	16		0,0040
	12		0,0047
	10		0,0056
	6		0,0103

контактной податливости в соединениях модулей. Перемещение δ_B может быть определено по формуле

$$\delta_B = P \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^3}{3EJ_i} + 10^{-3} \frac{\theta_i}{M} \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 \right], \quad (4)$$

где P – нагружающая сила (например, сила резания), Н; l_i – длина i -го элемента вспомогательного инструмента, мм; J_i – осевой момент сечения i -го элемента, мм⁴ ($J_i = 0,05 d_i^4$ – здесь d_i – диаметр i -го сечения, мм); n – число элементов; E – модуль продольной упругости ($E = 2,1 \cdot 10^2$ ГПа); θ_i/M – податливость i -го соединения, (кН·м)⁻¹.

Данные о податливости различных соединений (углах поворота, отнесенных к нагружающему моменту $M = Pl$) приведены в табл. 7–10.

В качестве примера рассмотрим расчет перемещения δ_B сборной расточной оправки, показанной на рис. 2.

В примере приняты следующие параметры:

- точность изготовления конусов с конусностью 7:24 соответствует степени АТ7;
- зазор в цилиндрическом соединении соответствует посадке Н7/г6, что составляет не более 0,041 мм;
- $P = 1$ кН, $l_1 = 105$ мм, $l_2 = 20 + 135 = 155$ мм, $D = 69,85$ мм, $d = 48$ мм, $d_1 = 40$ мм.

Из формулы (4) следует, что для указанной сборной расточной оправки:

$$\delta_B = \frac{P(l_1 + l_2)^3}{3EJ_1} + \frac{Pl_2^3}{3EJ_2} + P \frac{\theta_1}{M} (l_1 + l_2)^2 + P \frac{\theta_2}{M} l_2^2, \quad (5)$$

где $\frac{\theta_1}{M}$ – податливость в конусе с конусностью 7:24 (см. табл. 7), (кН·м)⁻¹; $\frac{\theta_2}{M}$ – податливость в цилиндрическом соединении (см. табл. 8), (кН·м)⁻¹.

После постановки размерных параметров получается:

$$\begin{aligned} \delta_B &= \frac{1 \cdot 260^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,05 \cdot 69,85^4} + \frac{1 \cdot 155^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^3 \cdot 0,05 \cdot 40^4} + \\ &+ 0,00035 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 260^2 + 0,0015 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 155^2 = \\ &= 0,0234 + 0,0462 + 0,0237 + 0,0360 = 0,1293 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таким образом расчетная величина податливости $\delta_B/P = 0,129$ мкм/кН. Сравнение полученного результата с данными о допустимом перемещении показывает, что этот вариант крепления удовлетворяет требованиям к креплению расточных оправок для полуставовой обработки.

При проектировании МИН для чистового растачивания конструктору, чтобы сборная оправка соответствовала критерию допустимой податливости 0,115 мкм/кН, необходимо повысить точность присоединительных поверхностей

конусов с конусностью 7:24 до АТ4, а цилиндрических соединений – до посадки Н6/г5. Другим способом уменьшения перемещения является существенное уменьшение вылета, однако это приведет к сужению области применения данной МИН.

Выводы

Путем решения уравнения сложной размерной цепи, образованной отклонениями линейных и угловых размеров элементов технологической системы, возможно определить биение режущей части режущих вставок МИН как замыкающего звена в рабочем пространстве металлорежущего станка. Используя в качестве критериев допустимые биения режущих кромок резовых вставок, установленных в составе МИН на металлорежущем станке, можно решать проектные задачи назначения допускаемых отклонений сопрягаемых поверхностей элементов МИН.

Определение деформаций тел модулей и поверхностных слоев в их стыках в зависимости от таких факторов, как величины и вид нагружения, величины и распределения давлений, величины зазоров и точности размеров сопрягаемых поверхностей, может служить проверочным расчетом после назначения допускаемых отклонений сопрягаемых поверхностей элементов МИН по критерию допустимого биения режущих кромок.

Литература

1. **Маслов А. Р.** Модульные инструментальные наладки // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 2 (023). С. 86–92.
2. **Маслов А. Р., Смолкин Е. М., Тивирев Е. Г.** Модульные расточные инструментальные наладки // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 4 (025). С. 48–57.
3. **Маслов А. Р.** Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2006. 335 с.
4. **Худяков М. П.** Повышение эффективности агрегатно-модульных расточных инструментов методами математического моделирования: дисс. канд. техн. наук. М.: МГТУ «СТАНКИН». 1998. 213 с.
5. **Аслибекян С. Р., Мещеряков Р. К.** Расширение технологических возможностей вспомогательного инструмента блочно-модульной конструкции // Станки и инструмент. 1988. № 2. С. 12–15.

Авторы

Маслов Андрей Руффович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» ФБГОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана»

Тивирев Евгений Геннадьевич –

кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Инструментальная техника и технологии» ФБГОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана»

21-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ



weldex

0+

11-14
ОКТАБРЯ

2022

РОССИЯ, МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО

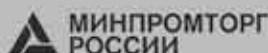
Разделы выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Нанесение защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты
- Оборудование для обработки кромок



weldex.ru

Официальная поддержка:



Свяжитесь с Организатором, чтобы узнать об условиях участия: weldex@hyve.group | +7 (499) 750-08-28

**15–21 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ**

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

WWW.RUSARMYEXPO.RU