Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья Статья в открытом доступе УДК 62-911 doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-4-13

АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО СБЛИЖЕНИЯ В ПЛОСКИХ СТЫКАХ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ

Александр Григорьевич Федуков[⊠]

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия fedukov.lvdu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8245-8610

Аннотация

Цель исследования: анализ величин контактного сближения в плоских стыках специального оборудования, при использовании унифицированных модулей, полученных входе эксперимента и существующих зависимостей. Задача, сравнение величин контактных сближений полученных в результате расчетов по существующим зависимостям с результатами экспериментов. Методы исследования: экспериментальные исследования и уже существующие расчетные методы исследования по определению величины контактного сближения. Новизна работы: получены уточненные зависимости, а также значения коэффициентов уже существующих зависимостей для расчета величин контактных сближений протяженных деталей унифицированных модулей при их сборке. Результаты исследования: проведен анализ полученных результатов расчетов и экспериментов. Уточнены значения коэффициентов уже для существующих методов расчета контактного сближения, а также получены экспериментальные зависимости. Выводы: исследования показали, что для протяженных участков контакта использование расчетных зависимостей в некоторых условиях дает погрешность, которой нельзя пренебречь. При проектировании оборудования высокой точности такие расчеты требуют уточнения.

Ключевые слова: точность, унифицированные модули, контактные сближения.

Ссылка для цитирования:

Федуков А.Г. Анализ контактного сближения в плоских стыках специального оборудования при использовании унифицированных модулей / А.Г. Федуков // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 01. – С. 4 – 13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-4-13.

Original article Open Access Article

ANALYSIS OF CONTACT APPROACH IN FLAT JOINTS OF SPECIAL EQUIPMENT WHEN USING UNIFIED MODULES

Aleksandr Grigoryevich Fedukov[⊠]

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia fedukov.lvdu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8245-8610

Abstract

The study objective is to analyze the values of contact approach in the flat joints of special equipment, using unified modules obtained from the experiment and existing dependencies. The task is to compare the values of contact approaches obtained as a result of calculations based on existing dependencies with the results of experiments. Research methods: experimental studies and already existing computational methods of research to determine the values of contact approach. The novelty of the work: refined dependencies are obtained, as well as the values of coefficients of already existing dependencies for calculating the values of contact approaches of extended parts of unified modules during their assembly. Research results: the obtained results of calculations and experiments are analyzed. The values of the coefficients for the existing methods of calculating contact approach are refined, and experimental dependences are obtained. Conclusions: studies have shown that for extended contact sections, the use of calculated dependencies in some conditions gives an error that cannot be neglected. When designing high-precision equipment, such calculations require accurate definition.

Keywords: accuracy, unified modules, contact approaches.

Reference for citing:

Fedukov AG. Analysis of contact approach in flat joints of special equipment when using unified modules. Transport Engineering. 2023; 1:4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-4-13.

Введение

В настоящее время при проектировании, изготовлении различного технического оборудования все чаще применяют стандартные унифицированные узлы и модули. Данная тенденция не прошла мимо и станкостроения. Современное оборудование должно обладать высокой точностью изготовления деталей. Поэтому проблема конструкторско – технологического обеспечения точности станочного оборудования, является актуальной.

С использованием унифицированных модулей, значительно возрастает число

Основная часть

Контактные перемещения в плоском стыке под нагрузкой характеризуются величиной контактной жесткости, рассчитываемой по формуле [1-3]:

$$j = \frac{P}{y}, \qquad (1)$$

где *P* – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую номинальную площадь контакта, *y* – контактные перемещения. Данная зависимость может быть использована только как характеристика стыка для определенной нагрузки. Обычно контактная задача является нелинейной.

Исследованиями контактных деформаций стыков посвящено большое количество работ авторами, которых являются: К.В. Вотинов, И.Г. Горячева, И.Т. Гусев, Н.Б. Демкин, Ю.Н. Дроздов, Иванов, B.B. Измайлов, A.C. И.В. Крагельский, З.М. Левина, Д.Н. Решетов, Э.В. Рыжов, А.П. Соколовский, А.Г. Суслов, и др.

В инженерной практике используется следующая зависимость[1-3]:

$$\delta = C\sigma^m \,, \tag{2}$$

плоских стыков. Обычно при проектировании узлов станочного оборудования для обеспечения точности применяют расчеты размерных цепей. При этом величиной контактных деформаций в стыках пренебрегают. В традиционных конструктивных решениях это обосновано, небольшим количеством плоских стыков. При модульном проектировании высокоточного оборудования величиной контактных деформаций пренебрегать не следует, потому что в некоторых случаях они могут быть сопоставимы с допусками на размер.

где σ – среднее давление в стыке, кг/см²; показатель степени m = 0,5; значение коэффициента *С* меняется от 1,5 при черновом шабрении до 0,07 при притирке [1-3]. Параметры качества поверхности в этой зависимости учитываются с большим приближением. Коэффициент в ней лишь косвенно учитывает геометрию и микрогеометрию поверхности.

Дальнейшее развитие методы расчета деформаций стыков получили в работах А.С. Иванова и В.В. Измайлова [4]. Ими предложена зависимость, более точно учитывающая геометрические и физикомеханические свойства контактирующих поверхностей:

$$\frac{\delta}{Ra} = C_0 \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{\mathrm{E}}},\tag{3}$$

где $Ra = (Ra_1 + Ra_2)/2$, Ra_1 , Ra_2 – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей деталей; $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$ – приведенный модуль упругости контактирующих поверхностей деталей; C_0 – коэффициент, учитывающий взаимное расположение микронеровностей; ε – коэффициент влияния масштаба, учитывающий влияние волнистости и отклонений формы (масштабный фактор). Эмпирические коэффициенты корректируют погрешности теоретической зависимости.

Рассмотрим определение контактных деформаций, на примере плоского стыка

«базовая плита – направляющий рельс», которые ранее рассматривались в работе [5]. Он встречается в большинстве современных конструкций станочного оборудования использующие направляющие качения, в которые входит рельсовая направляющая и каретка (рис. 1).



Puc. 1. Схема установки рельса без учета контактного сближения и с учетом Fig. 1. Rail installation diagram without taking into account the contact approach and taking into account

Номинальным исполнительным размером направляющей является размер A (расстояние от подошвы рельса до верхней плоскости каретки. Этот размер унифицирован, частично стандартизован. При креплении рельса к базовой плите в стыке возникают контактные деформации δ_1 . Расстояние от верхней плоскости каретки до плоскости плиты уменьшится и конструктор, в идеале, должен работать с размером Б:

$$\mathbf{E} = A - \delta_1 \tag{4}$$

Контактные сближения в стыке (δ_1), при сборке возникающие являются коррекцией конструктивного размера (рис. 1). Однако, приведенные выше инженерные зависимости, разработаны для весьма общих случаев и, очевидно, имеют ограничения для использования. Рельсовые направляющие, ШВП имею большие площади контакта, значительную протяженность ограниченной при жесткости. В этой ситуации возрастает роль волнистости, макроотклонений, упрощенно учитываемых зависимостями (1) и (3). В ходе данной работы были проведены исследования возможности использования указанных формул лля оценки контактных сближений, ИХ погрешностей, путей уточнения.

Для исследования были использованы рельсовые направляющие длиной 125, 215, 300, 400, 470, 650 мм, которые устанавливались к стальной шлифованной плите. Параметры стыка «рельс-плита» близки к рекомендуемым для реального оборудования. Жесткостью стыка «рельс-каретка» пренебрегаем.

Исследования проводились путем измерения контактных деформаций в семи точках с равным шагом в зависимости от длины рельса, с помощью индикатора часового типа. При измерениях затягивалась направляющая винтами динамометрическим ключом с рекомендуемым крутящим моментом 30 Н⋅м [6]. Контролировались деформации при первом и повторном нагружениях, а также восстановление стыка после снятия нагрузки. Более подробно данный способ определения контактных деформаций описан в работе [7].

определения Для контактных деформаций по зависимостям (2) и (3) была проведена оценка параметров поверхностного слоя деталей. Были произведены измерения шероховатости, волнистости. При этом интерес вызывают гармоники волнистости с большим шагом (десятки миллиметров). Параметры шероховатости были измерены профилометром, а волнистости с помощью используемого при шабрении метода для проверки плоскостности деталей поверхностей.

Он заключается в следующем. На поверочной плите, на два ролика устанавливает базовая жесткая пришабренная плоскопараллельная планка. Ha неё устанавливается индикаторная стойка с индикатором. Индикатор подводится к плоскости измеряемой детали и перемещается вдоль нее. Базовая планка с индикатором катится на роликах по поверочной плите, что позволяет минимизировать погрешности Измерения отклонений измерений. ОТ

плоскостности выполняются с определенным шагом и заносятся в таблицу. Отклонения сводились в график, по которому и определялись параметры волнистости. Данный способ описан более подробно в работе [8].

В табл. 1 приведены контактные сближения, рассчитанные по зависимостям (2), (3) и полученные опытным путем.

Совместный график сравнения расчетов по зависимости (2) с экспериментом представлен на рис. 2.

Таблица 1

Table 1

The amount of contact convergence, for different rail lengths				
Длина рельса, мм	Контактное сближе- ние, рассчитанное по зависимости (2) δ_1 , мкм	Контактное сближение, рас- считанное по за- висимости (3) б ₂ , мкм	Контактное сближение полученное эксперимен- тально, δ _φ , мкм	
125	2,8	9,2	20,8	
215	2,6	8,6	12,7	
300	2,5	4,2	5,8	
400	2,5	4,1	2,9	
470	2,5	4,1	2,8	
650	2,4	2,0	2,5	

Величина контактного сближения, для разной длины рельс

Из графика, анализа полученных результатов, видно, что расчетные и экспериментальные контактные сближения для стыков длиной от 400 мм до 650 мм практически одинаковы. В диапазоне длин от 125 мм до 400 мм результаты существенно отличаются, в некоторых случаях в несколько раз.

Данная погрешность может сказаться при расчетах размерных цепей высокоточного оборудования, использование зависимости (2) в данном случае некорректно.



На рис. 3 представлен совместный график контактных сближений, получен-

ных расчетом по формуле (3) и экспериментальным путем.



Из графика видно, что зависимость (3) также дает погрешность при расчетах, хотя и существенно меньше, чем зависимость (2). Характер расчетной кривой зависит от волнистости базовой поверхности, параметры которого входят в поправочный коэффициент є. При этом фактические деформации для коротких рельсов больше расчетных, длинных – незначительно меньше. В табл. 2, представлены отношения фактических значений контактного сближения, к значениям, полученным по каждой из проверенных зависимостей.

Таблица 2

Results of calculation of contact approaches				
Длина рельса, мм	Отношение $\delta_{\phi} / \delta_{(2)}$	Отношение $\delta_{\phi} / \delta_{(3)}$		
125	7,4	2,3		
215	4,9	1,5		
300	2,3	1,4		
400	1,2	0,7		
470	1,1	0,7		
650	1,04	1,25		

Результаты вычисления контактных сближений

Table 2

Проведенные исследования показали, что использование зависимостей (2) (3) для расчета контактных сближений в протяженных стыках (как стык «рельс-базовая плита») в ряде случаев может давать недостоверные результаты.

Простейшим инженерным решением в данном случае является использование поправочного коэффициента. В нашем

случае из-за различной величины погрешности в зависимости от длины направляющей поправочный коэффициент целесообразно установить для определенного диапазона длин.

Рассчитаем поправочные коэффициенты для зависимости (2) для полученных значений контактных деформаций от длины рельса. Зависимость для расчетов примет вид

$$\delta = \kappa_2 C \sigma^m, \tag{5}$$

В табл. 3 приведены коэффициенты для зависимости (5) для определения величины контактного сближения.

Таблица 3

Определение коэффициента для зависимости (5) для определения величины контактного сближения

Table 3

Determination of the coefficient for the dependence (5) to determine the magnitude of the contact convergence

	<i>v</i>	0	
Плино	Контактное сближение	Контактное сближение получен-	Коэффициент
длина рельса, мм	по зависимости (2)	ное экспериментально,	\mathbf{k}_2
	δ ₁ , мкм	δ э, мкм	δ_1 / δ_3
125	2,8	20,8	10
215	2,6	12,7	4,9
300	2,5	5,8	2,3
400	2,5	2,9	1,16
470	2,5	2,8	1,12
650	2,4	2,5	1,04

Аналогично рассчитаем поправочные коэффициенты для зависимости (3) для полученных значений контактных деформаций от длины рельса. Тогда зависимость для расчетов будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\delta}{Ra} = \kappa_3 Ra C_0 \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \,. \tag{6}$$

В табл. 4 приведены поправочные коэффициенты для зависимости (6) для определения величины контактного сближения

Таблица 4

Величина контактного сближения, для разной длины рельс

Table 4

	Контактное сближе-	Контактное сближе-	
Длина рельса, мм	ние по зависимости	ние эксперименталь-	Коэффициент k ₃
	(3)	ное,	δ_1 / δ_3
	δ ₂ , мкм	δэ, мкм	
125	9,2	20,8	4,52
215	8,6	12,7	1,47
300	4,2	5,8	0,46
400	4,1	2,9	0,35
470	4,1	2,8	0,17
650	2,0	2,5	0,31

The amount of contact convergence, for different rail lengths

Кроме использования скорректированных существующих зависимостей, расчеты можно выполнять по формулам, полученным путем аппроксимации табулированных результатов экспериментальных исследований. Для этого были использованы два типа аппроксимирующих моделей: степенная и полиномиальная. Математическая обработка данных и подбор параметров зависимостей были выполнены с помощью программы *MS Excel*.

Результаты аппроксимации по степенному закону табулированных данных показаны на рис. 4.

Математическая зависимость, описывающая экспериментальные значения выглядит следующим образом:

$$y = 24889 \cdot x^{1,46} . \tag{7}$$

Следует отметить, что зависимость (7), по сути, аналогична зависимостям (2) и (5), отличается способом получения и параметрами.

Из графика видно, что степенной закон точнее описывает кривую, полученную в ходе экспериментов, но погрешность также присутствует.



Рис. 4. Графики экспериментальных и расчетных значений степенного закона *Fig. 4. Graphs of experimental and calculated values of the power law*

Рассмотрим величину абсолютной и относительной погрешности для принятых

длин направляющих. Результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты вычисления погрешности для степенной зависимости

Table 5

Длина рельса, мм	Значения контакт- ных деформаций полученные в ходе экспериментов, мкм	Значения контактных деформаций получен- ные по линейной за- висимости, мкм	Абсолютная погрешность, мкм	Относительная погрешность, %
125	20,8	21,60	0,80	3,86
215	12,7	9,79	-2,91	-22,94
300	5,8	6,03	0,22	3,75
400	2,9	3,95	1,05	36,33
470	2,8	3,12	0,32	11,58
650	2,5	1,95	-0,55	-22,16

Results of error calculation for power dependence

Анализ данных таблицы показывает, что несмотря на то, что в ряде случаев относительная погрешность значительна (до 36 %), абсолютные величины погрешности крайне малы. С учетом технологических ограничений неточностью расчетов можно пренебречь. На рис. 5 показан график, построенный по полиномиальному закону для полученных данных. Математическая зависимость, описывающая экспериментальные значения выглядит следующим образом:

$$y = -0,0000001887x^3 + 0,0003406891x^2 - 0,2012398172x + 41,2637875192$$
(8)

По полученному графику, можно видеть, что полиномиальный закон точно описывает кривую, полученную в ходе экспериментов. Абсолютная и относительная погрешность данной зависимости представлена в табл. 6. Анализ показывает, что абсолютная погрешность расчетов менее 1 мкм, относительная ошибка достигает 16 %. Таким уровнем погрешности в практической инженерной деятельности можно пренебречь.



Рис. 5. График экспериментальных значений и линии тренда описывающая полиномиальный закон *Fig. 5. Graph of experimental values and a trend line describing the polynomial law*

Таблица 6

Результаты вычисления погрешности

Frror calculation results

Table 6

Длина рельса, мм	Значения контакт- ных деформаций полученные в ходе экспериментов, мкм	Значения контактных деформаций получен- ные по полиномиаль- ной зависимости, мкм	Абсолютная погрешность, мкм	Относительная погрешность, %
125	20,8	21,06	0,26	1,27
215	12,7	11,87	- 0,83	- 6,5
300	5,8	6,46	0,66	11,36
400	2,9	3,20	0,30	10,39
470	2,8	2,35	-0,45	- 16,15
650	2,5	2,58	0,08	3,09

Выводы

Проведенные исследования показали, что для протяженных участков контакта использование расчетных зависимостей (2) и (3) в некоторых условиях дает погрешность, которой нельзя пренебречь. При проектировании оборудования высокой точности такие расчеты требуют уточнения. При отношении длины к ширине менее 13 лучшую точность дает расчет по зависимости (3).

Полученные поправочные коэффициенты позволяют обеспечить точность расчетов по зависимостям (2) и (3) пригодную для проектных расчетов оборудования высокой точности. В ходе аппроксимации результатов экспериментальных исследований получены инженерные зависимости для расчета контактных сближений. Хорошие результаты при этом показало использование степенной и полиномиальных зависимостей.

Зависимости, полученные путем аппроксимации, лучше описывают контакт-

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков, т.1. М.: Машиностроение. 1972. – 664 с.
- Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин/ Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
- Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей // М.: Машиностроение. 1987. – 208 с.
- Иванов А.С., Ермолаев М.М., Руднев С.К. Метод расчета соединения с натягом в общем случае нагружения// Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2015. вып 1. С. 75-83.
- Федуков А.Г. Анализ существующих методов расчета контактной жесткости на примере рельсовых направляющих // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: сб. тр. междунар. научно-

REFERENCES

- 1. Reshetov DN. Details and mechanisms of metalcutting machines. Moscow: Mashinostroenie; 1972.
- 2. Ryzhov EV, Suslov AG, Fedorov VP. Technological support of operational properties of machine parts. Moscow: Mashinostroenie; 1979.
- Suslov AG. Technological support of parameters of the part surface layer. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
- Ivanov AS, Ermolaev MM, Rudnev SK. Method of calculating the connection with tension in the general case of loading. Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. 2015;1:75-83.
- Fedukov AG. Analysis of existing methods for calculating contact stiffness on the example of rail guides. Ensuring and Improving the Quality of Machine-building and Aerospace Engineering Products: Collection of Papers of International Scientific

Информация об авторах:

Федуков Александр Григорьевич - аспирант, заведующий лабораторией кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, г. Брянск, ные сближения в стыках принятого типа и параметров. Погрешности расчетов по этим зависимостям пригодны для инженерной практики.

Точность полиномиальной зависимости существенно выше, абсолютная погрешность расчетов в принятом диапазоне длин направляющих не превышает 1 мкм.

техн. конф., 19-20 февраля 2020 / Брянский гос. техн. ун-т. Брянск, 2020. С. 110-114. ISBN: 978-5-907271-27-2.

- 6. Каталог компании «HIWIN» по производству линейных направляющих. 147 с.
- Федуков А.Г., Хандожко А.В., Польский А.Н., Щербаков А.Н. Обеспечение точности станочных узлов на базе унифицированных модулей с учетом контактной жесткости стыков // Вестник «БГТУ». Машиностроение машиноведение. 2019. №3. С. 51-59.
- Fedukov A.G., Khandozko A.V. «Technological Quality Assurance of Assembling Machine Components Based on Modular Elements, Taking into Account the Contact Stiffness of the Joints» International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). volume 188. p. 109-116.

and Technical Conference; 2020 Febr 19-20; Bryansk: Bryansk State Technical University: 2020. p. 110-114.

- 6. Catalog of the company *HIWIN* for the production of linear guides.
- Fedukov AG, Khandozhko AV, Polsky AN, Shcherbakov AN. Machine unit accuracy assurance based on common modules taking into account joints contact stiffness. Bulletin of BSTU. Mechanical Engineering Machine Science. 2019;3: 51-59.
- Fedukov AG, Khandozko AV. Technological quality assurance of assembly of machine parts based on modular elements taking into account the contact stiffness of joints. International Conference on Aircraft Mechanics and Transport (AviaENT 2019). 2019;188:109-116..

бул. 50 лет Октября, д. 7, 241035; тел. 8-906-502-59-67; Author-ID-РИНЦ 1134724; Scopus Author ID: 57201771898; ResearcherID Web of Science: GPX-1698-2022. **Fedukov Aleksander Grigoryevich** - Postgraduate Student, Head of the Laboratory of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Bryansk, 7, 50-let Oktyabrya

Статья опубликована в режиме Open Access. Article published in Open Access mode. Boulevard, 241035; phone: 8-906-502-59-67; Author-ID-RSCI 1134724, Scopus Author ID: 57201771898; ResearcherID Web of Science: GPX-1698-2022.

Статья поступила в редакцию 17.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 26.12.2022. Рецензент – Соловьев Д.Л., доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.08.2022; approved after review on 16.09.2022; accepted for publication on 26.12.2022. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Murom Branch (Institute) of Vladimir State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.