

УДК 62-187.4

DOI: 10.30987/article_5c3db11190a975.91435272

А.Г. Федуков, А.В. Хандожко, Е.А. Польский, А.Н. Щербаков

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СТАНОЧНЫХ УЗЛОВ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ СТЫКОВ

Рассмотрены вопросы обеспечения и повышения точности специального технологического оборудования, изготавливаемого с широким применением унифицированных модулей. Изучено влияние контактной жесткости на размерные цепи.

Показано, что величина контактных деформаций в стыках при использовании унифицирован-

ных модулей сопоставима с допусками на их изготовление и должна учитываться при расчете исполнительных размеров деталей сопряжений.

Ключевые слова: точность, унифицированные модули, шарико-винтовая пара, линейные направляющие, контактная жесткость.

A.G. Fedukov, A.V. Khandozhko, E.A. Polsky, A.N. Shcherbakov

MACHINE UNIT ACCURACY ASSURANCE BASED ON COMMON MODULES TAKING INTO ACCOUNT JOINTS CONTACT STIFFNESS

The work purpose consists in the accuracy increase and assurance of technological equipment manufactured with the wide use of common modules at the expense of the impact of joints contact stiffness.

The investigation methods: a theoretical analysis of metal parts contact taking into account their microgeometry, experiments with the use of common modules and means for linear value measurements.

The study showed that the value of contact deformations in joints at common modules use is comparable with tolerances for their manufacturing and must be taken into account at the computation of executive dimensions for parts of mating. The existing computa-

tions of the value of approach for small areas of a contact have considerable dimensions for which these procedures give large errors.

The application extension of ready common modules in the technological equipment structures and in the joints increase requires design procedure corrections. It is necessary to improve the computation procedures for parts contact approach and also the procedures for the formation and computation of complex spatial dimensional chains including contact deformations.

Key words: accuracy, common modules, ball-screw pair, linear guides, contact stiffness.

Производство технологического оборудования является важнейшей задачей промышленности государства, обеспечивая его экономическую безопасность, авторитет в мире. В последнее время все более актуальным и распространённым становится модульное проектирование. Эта тенденция характерна и для станочной промышленности.

При проектировании и производстве станков и станочных комплексов все чаще используются унифицированные модули. В связи с большим разнообразием конструктивных решений и технических требований выпускается широкая номенклатура унифицированных деталей, узлов различной степени интеграции.

Эти изделия производятся в широком диапазоне размеров, степеней точности, параметров несущей способности, скоростных характеристик на специализированных предприятиях в условиях массового или крупносерийного производства. Это обеспечивает хорошее качество при умеренной цене.

Большой выбор готовых деталей и модулей дает конструктору возможность проектирования конструкций, близких к оптимальным, при существенном сокращении трудозатрат – как на стадии проектирования, так и при изготовлении.

В перечень таких унифицированных модулей и изделий входят в первую очередь [1]: системы числового программного управления (ЧПУ), электрошкафы, ком-

плектные шариковые винтовые пары (ШВП), линейные направляющие, электрошпиндели, системы защиты направляющих, датчики для контроля деталей и настройки инструментов и т.д.

При этом возможно использование модулей различной степени интеграции. Например, направляющие качения могут поставляться в виде отдельных рельсов и кареток, могут включать в себя узлы смазки и защиты от загрязнений. В ряде случаев используют модули еще более высокой степени интеграции, например в виде готовых комплектных координат, включающих в себя рельсы, каретки, ШВП, подшипниковые опоры, привод, систему смазки и защиты от загрязнений, собранные на базовых несущих элементах.

В связи с изменившейся технологией конструирования возник вопрос модерни-

зации существующих и разработки новых расчетных методик.

Большинство методик проектирования деталей и узлов станков были созданы для традиционных конструкторских решений. По этой причине в них недостаточно проработаны вопросы расчета узлов с направляющими качения, сложными размерными цепями. При использовании модульных конструкций часто возникают ситуации, когда конструктор сталкивается с задачами, решение которых не отражено в справочной литературе и которые ему приходится решать, опираясь только на свой опыт и интуицию.

Рассмотрим такую задачу на примере комплектной линейной координаты (рис. 1).

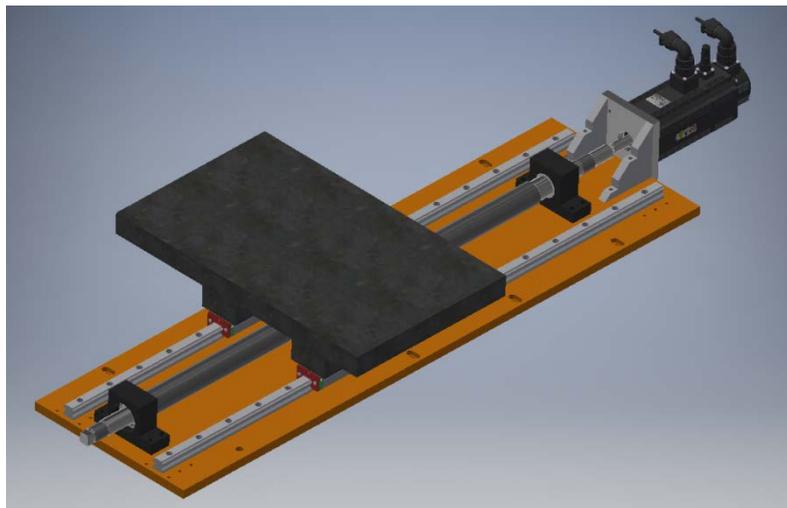


Рис. 1. Схема комплектной линейной координаты

Конструкция включает в себя базовую плиту, на которой устанавливаются линейные направляющие с каретками и комплектная ШВП, включающая винт, гайку и подшипниковые опоры, а также стол. Кроме того, в модуль входит электродвигатель, установленный на базовой плите с помощью кронштейна. Двигатель соединен с винтом с помощью упругой компенсирующей муфты.

Из-за значительных диаметральных размеров ШВП невозможно разместить в одной плоскости стол, каретки и поверхность корпуса гайки. Поэтому необходимо либо заглубление подшипниковых опор

ШВП, либо установка стола на проставках (рис. 1).

В этом случае у нас возникает сложная пространственная размерная цепь, включающая в себя не только размеры деталей, но и деформации стыков, возникающие при сборке. Расчет такой размерной цепи требует применения более сложных методик по сравнению с традиционными.

В такой постановке задача рассмотрена и частично решена в работе [2]. Возникшая размерная цепь показана на рис. 2.

В идеале правильное контактирование поверхностей происходит в случае,

когда $L+K=F+G=H$. При этом размер H должен быть постоянным для всех кареток и подшипниковых опор.

Высотный размер, формируемый со стороны направляющих, равен: $H=$ высота

каретки с рельсом (L) + высота проставки (K). В размерную цепь также включаются контактные деформации трех стыков: рельса с базовой плитой, проставки с кареткой и стола с проставкой.

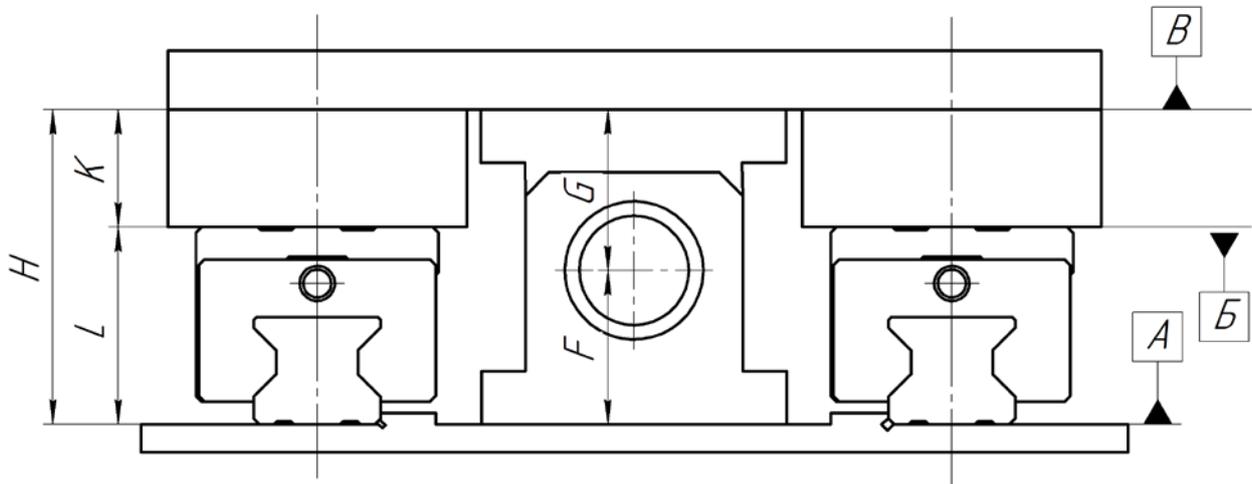


Рис. 2. Схема размерной цепи

С другой стороны этот же высотный размер H формируется в цепи ШВП. Он включает в себя расстояние от оси основных отверстий корпуса подшипника до его базовой плоскости (F) и аналогичный размер для гайки ШВП (G). В эту цепь также входят два стыка, имеющие контактные деформации: корпуса подшипниковой опоры и базовой плиты и гайки ШВП со столом.

Фактически данные цепи еще сложнее: в них могут участвовать угловые отклонения монтажа рельсовых направляю-

щих, кареток, непараллельность оси винта ШВП базовой плоскости, а также контактные деформации в рельсовых направляющих (линейные) и винтовой передаче (линейные и круговые). С учетом высокой точности изготовления деталей ШВП и рельсовых направляющих в первом приближении эти деформации можно не учитывать.

Размерная цепь для ШВП представлена на рис. 3. Замыкающим размером является высота проставки K .

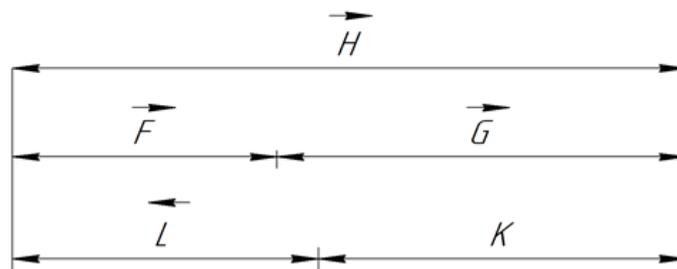


Рис. 3. Размерная цепь

Обеспечение точности этого размера методом полной взаимозаменяемости затруднительно. На практике эту точность часто обеспечивают методом индивидуальной пригонки, что резко удорожает продукцию, увеличивает время изготовления узла. Сама технология при этом силь-

но зависит от квалификации и добросовестности исполнителя.

Помимо геометрических размеров на точность влияет контактная жесткость стыков. Деформация стыков, как правило, больше деформации сопряженных деталей, поэтому жесткость оборудования в значительной мере зависит от величин контакт-

ных перемещений, т.е. жесткости стыков. Контактная жесткость стыков определяет способность поверхностных слоев деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать [3 – 5].

$$j = \frac{P}{y},$$

где P – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта; y – контактные перемещения [3 – 5].

В ряде случаев вместо контактной жесткости удобнее работать с обратной величиной – податливостью стыка.

Даже для тщательно обработанных базовых плит и рельсовых направляющих величина контактных деформаций относи-

тельно велика и требует учета. Особую специфику имеет оценка контактной жесткости для протяженных и нежестких деталей (рельс направляющий). Оценка фактических деформаций была выполнена экспериментально для рельсовой направляющей номинального размера 30 высшего (Н) класса точности. Длина направляющей – 620 мм, номинальная площадь контакта – 173,6 см².

Базовая плита изготовлена из стали 20, окончательная механическая обработка – шлифование.

Профилограммы, снятые с направляющей и плиты, показаны на рис. 4, 5, результаты измерений – в табл. 1, 2.

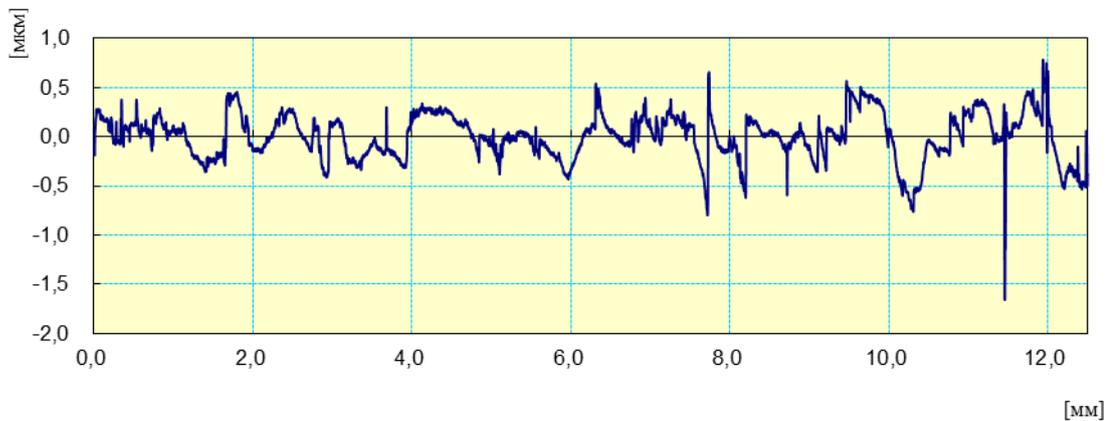


Рис. 4. Профилограмма линейной направляющей

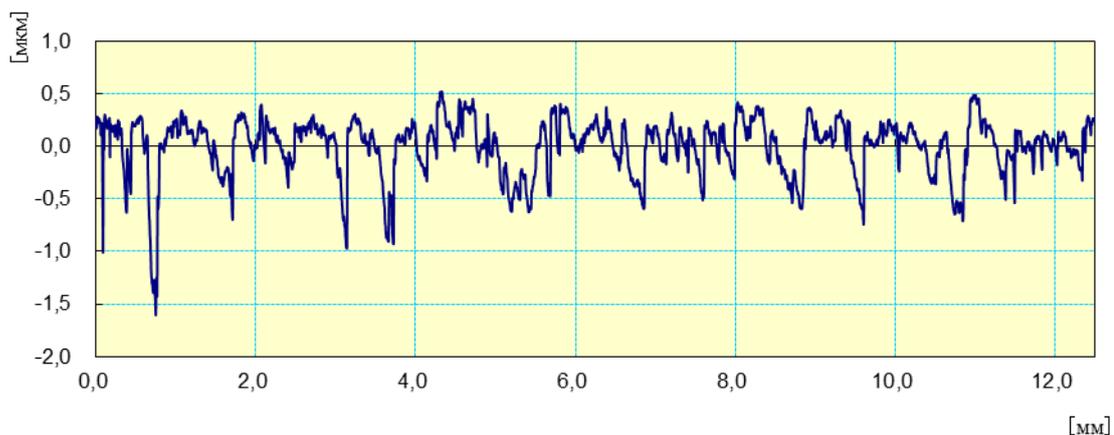


Рис. 5. Профилограмма базовой плиты

Визуальный анализ профилограмм показывает, что кроме микрорельефа про-

филь имеет явно выраженную волнистость.

Таблица 1

Результаты измерения шероховатости рельсовой направляющей

Параметр шероховатости	Продольное сечение, мкм	Поперечное сечение, мкм
Ra	0,20	0,32
Rz	1,60	2,50
Rp	0,63	0,80
Rmax	2,00	3,20

Таблица 2

Результаты измерения шероховатости базовой плиты

Параметр шероховатости	Продольное сечение, мкм	Поперечное сечение, мкм
Ra	0,16	0,16
Rz	1,25	2,00
Rp	0,40	0,60
Rmax	1,60	2,50

Исследование контактной жесткости выполнялось путем измерения контактных деформаций в семи точках с равным шагом 80 мм с помощью индикатора часового

типа (рис. 4). При измерениях направляющая затягивалась винтами динамометрическим ключом с рекомендуемым крутящим моментом 30 Н·м [6].

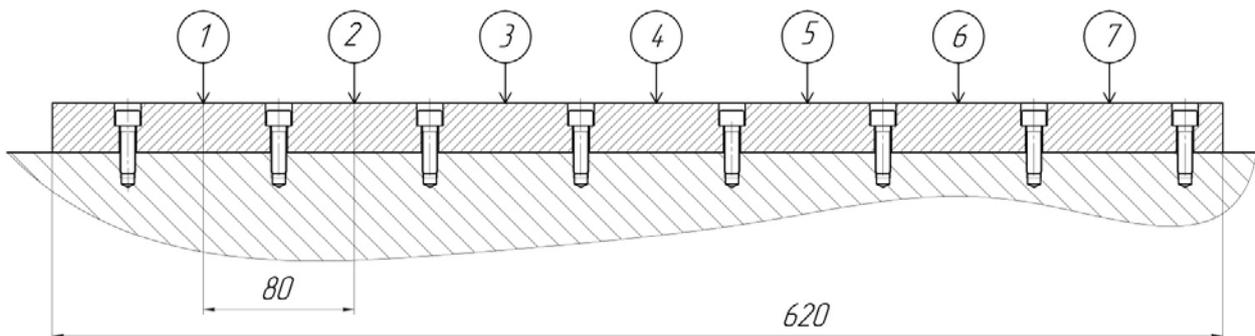


Рис. 6. Схема измерения деформаций линейной направляющей

Контролировались деформации при первом и повторном нагружениях, а также восстановление стыка после снятия нагрузки. Результаты исследования представлены на рис. 7.

Первоначальный замер был проведен без приложения нагрузки (рис. 7а, линия 1). Замеры показали, что контактирующие детали имеют макроотклонения, которые необходимо учитывать при оценке жесткости.

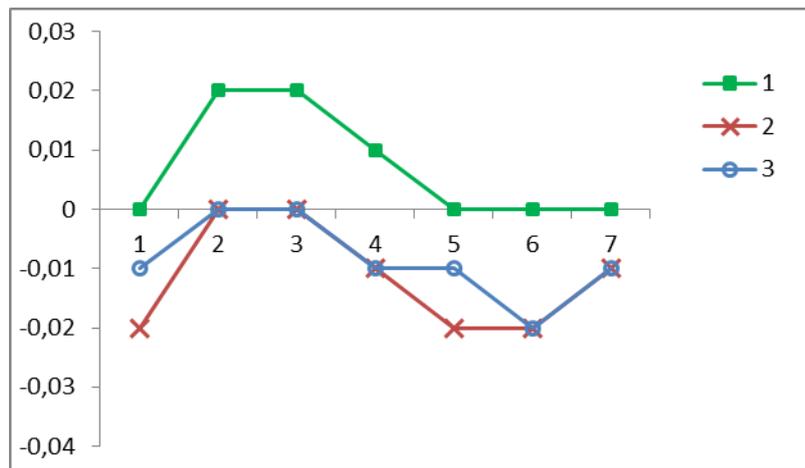
Контактные деформации в точках измерения при первом нагружении показаны на рис. 5а (линия 2). Величина этих деформаций одинакова в каждом сечении и составляет 0,02 мм.

При разгрузке после первого нагружения (рис. 7а, линия 3) восстановления

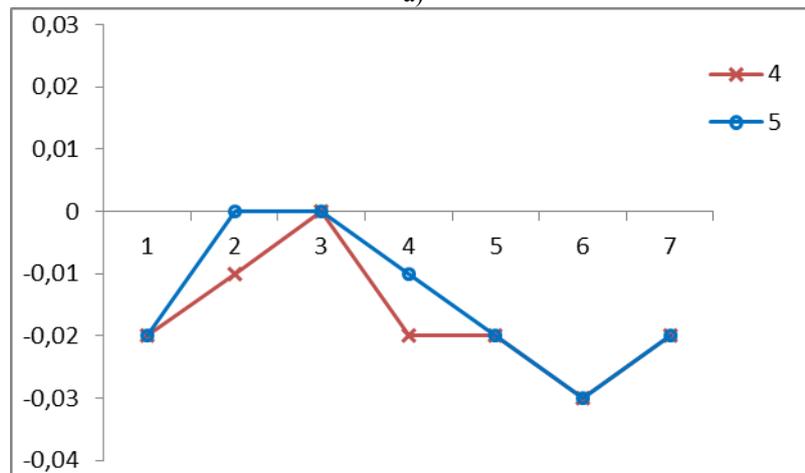
положения рельса практически не происходит.

На рис. 7б, в показаны контактные деформации для второго и последующих нагружений и разгрузений. Из рисунков видно, что при втором нагружении величины деформаций по сравнению с первым нагружением уменьшились почти в два раза. Третье нагружение дает деформации еще меньше. В некоторых точках измерения при использовании индикатора с ценой деления 0,01 мм не позволили зафиксировать смещения рельса.

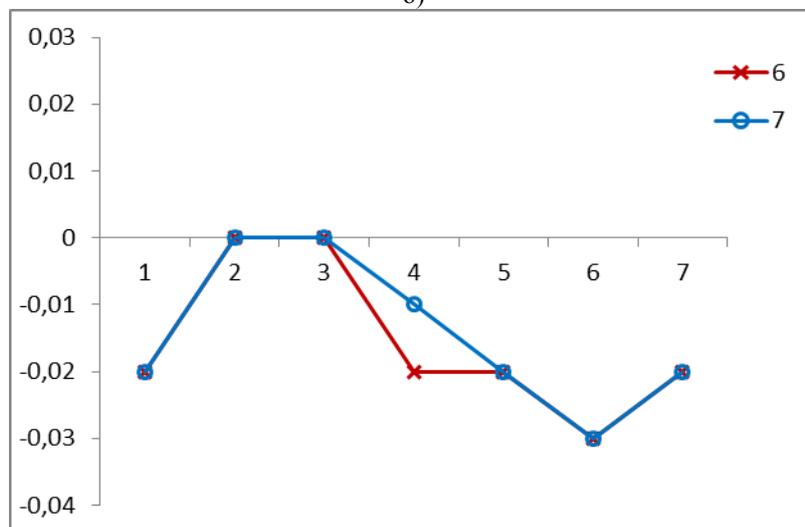
При разгрузке восстановление положения рельса практически полностью повторяет деформации при нагружении.



а)



б)



в)

Рис. 7. Деформация стыка «рельс – базовая плита» при воздействии и снятии нагрузки (в различных сечениях рельса): 1 – положение рельса в измеряемых сечениях без нагрузки; 2 – деформации после нагружения рельса; 3 – разгрузка рельса после нагружения; 4, 6 – деформации после повторного нагружения рельса; 5, 7 – разгрузка рельса после повторного нагружения

Номинальные размеры проставки составляют около 50 мм. При выполнении

размера К по 6-му качеству точности допуск на размер составит 16 мкм. Это отно-

сится и к допуску на высоту центра опоры ШВП. Таким образом, величина контактных деформаций сопоставима с допусками на изготовление деталей и должна учитываться при расчете исполнительных размеров деталей сопряжений (для схемы, показанной на рис. 2) на толщину проставки К. Величина коррекции размера может быть установлена с использованием эмпирических данных или же рассчитана.

Исследованиям сближения в контактном слое посвящены работы К.В. Воотинова, И.Г. Горячевой, И.Т. Гусева, Н.Б. Демкина, Ю.Н. Дроздова, А.С. Иванова, В.В. Измайлова, И.В. Крагельского, З.М. Левиной, Д.М. Решетова, Э.В. Рыжова, А.П. Соколовского, А.Г. Сулова, Г.Е. Чихладзе, В.В. Шелофаста и др.

Для определения контактного сближения была предложена следующая формула [3–5]:

$$\delta = C\sigma^m,$$

где σ – среднее давление в стыке, кг/см²; показатель степени $m=0,5$; значение коэффициента C меняется от 1,5 при черновом шабрении до 0,07 при притирке [3–5].

Предложенная формула носит инженерный характер и пригодна для предварительных расчетов, качество поверхностей учитывается в первом приближении коэффициентом m . В более поздних работах были предложены зависимости и методики расчета, учитывающие шероховатость и другие геометрические параметры поверхности детали. Такие зависимости получены Э.В. Рыжовым, Н.Б. Демкиным [5] и др.

Дальнейшее развитие методики расчета получили в работах А.Г. Сулова [4], А.С. Иванова и В.В. Измайлова [7].

В работе [7] была предложена зависимость для сопряжения «вал – втулка» между сближением δ и давлением p в контактном слое, учитывающая параметры, известные конструктору на стадии проектирования [7].

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

где $Ra = (Ra1 + Ra2)/2$, $Ra1$, $Ra2$ – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей деталей; $E = 2E1E2/(E1 + E2)$ – 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).

Более точно влияние волнистости и макроотклонений на контактную жесткость описывают зависимости, предложенные в работе [5].

Основы построения и расчета размерных цепей с учетом контактной жесткости сопрягаемых деталей рассмотрены в [8]. Для расчетов контактной жесткости предложены эмпирические зависимости для различных материалов. Например, для образцов, изготовленных из чугуна СЧ 21 и стали 40Х, зависимость имеет вид

$$j_{cp} = k_0 \frac{H_{\mu 0}^{k_5} \rho_m^{k_3} \rho_{mnp}^{k_4}}{R_p^{k_1} W_p^{k_2}}.$$

Коэффициенты k_0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 зависят от свойств материала, номера нагружения и др. Значения ρ_m и ρ_{mnp} , $H_{\mu 0}$, R_p , W_p – соответственно параметры макроотклонений, шероховатости, волнистости поверхности. Большое число табличных данных, поправочных коэффициентов затрудняет использование таких зависимостей на практике.

В последнее время некоторые ограниченные методические указания для проектирования приводят изготовители модулей. Обычно отклонения задают в табличной форме, но некоторые производители предлагают инженерные зависимости для расчета требуемой точности. В частности, допускаемую разновысотность рельсов (рис. 8) фирма SBC [9; 10] предлагает определять по зависимости

$$S_1 = a Y,$$

где S_1 – допустимая точность двухуровневого сдвига, мм; a – расстояние между двумя рельсами, мм; Y – константа.

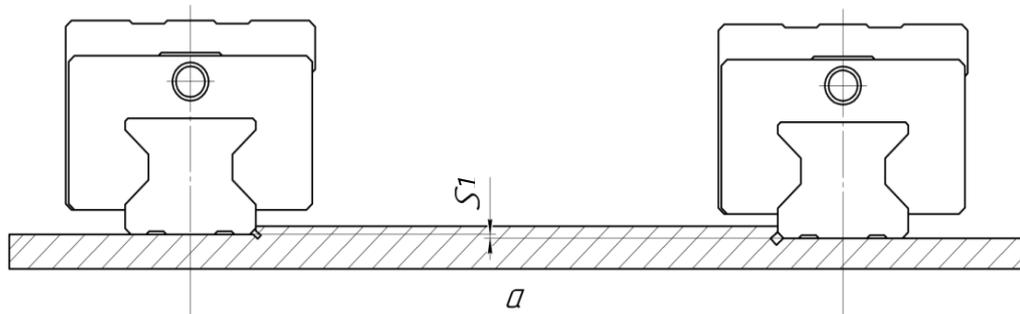


Рис. 8. Схема обеспечения точности базовой поверхности

Также линейная зависимость предложена для оценки допустимой разности высот рельсовых направляющих с кареткой (рис. 9) [9; 10]:

$$S_2 = b \times 0,00004,$$

где S_2 – допустимая точность в разности высот установленных кареток, мм; b – расстояние между каретками на одной направляющей, мм; x – табличная величина.

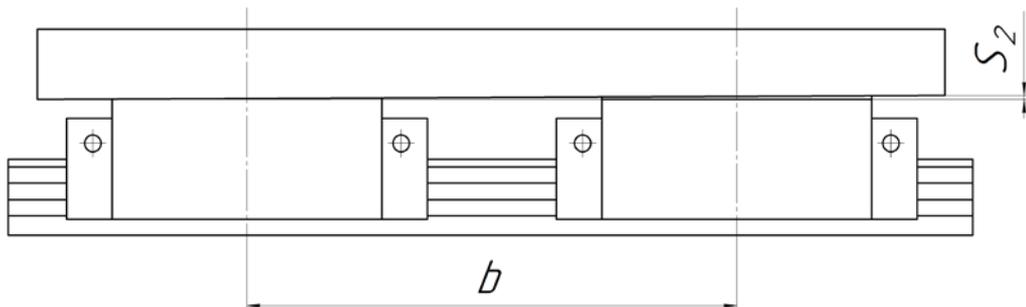


Рис. 9. Схема обеспечения точности базовой поверхности по высоте

Проведенный анализ позволяет сделать ряд выводов. Расширение использования в конструкциях технологического оборудования готовых унифицированных модулей требует коррекции методик проектирования. Необходимо усовершенствовать методики расчета и построения сложных пространственных размерных цепей с учетом контактных деформаций. Существующие расчеты величины сближения получены для небольших площадей контакта, а, например, линейные направляющие могут достигать нескольких метров. Таким

образом, необходимо усовершенствовать методики расчета контактных деформаций. Как показали эксперименты с линейной направляющей, величина сближения достигает величин допусков унифицированных деталей и модулей, что ведет к уменьшению точности. В связи с этим возникает проблема совершенствования методик расчета стыков на контактную жесткость, а также накопления и систематизации справочной информации, необходимой для этих расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стародубов, В.С. Модульный принцип построения металлорежущих станков с числовым программным управлением / В.С. Стародубов // Известия высших учебных заведений. – 2013. – № 1. – С. 68-74.
2. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности наукоемких сборочных узлов на этапах жизненного цикла / Е.А. Польский, О.А. Никонов, Н.С. Митраков, Ф.Д. Звягинцев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 8. – С. 328-338.
3. Решетов, Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков / Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1972. – Т. 1. – С. 664.
4. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 208.
5. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 176.

6. Каталог компании «HIWIN» по производству линейных направляющих. – С. 147.
7. Иванов, А.С. Метод расчета соединения с натягом в общем случае нагружения / А.С. Иванов, М.М. Ермолаев, С.К. Руднев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2015. – Вып. 1. – С. 75-83.
8. МР 32-82. Цепи размерные: Расчёт допусков с учётом условий контакта сопряжённых деталей

1. Starodubov, V.S. Modular principle in structure of NC Machine-Tools / V.S. Starodubov // *Proceedings of Higher Education Institutions*. – 2013. – No.1. – pp. 68-74.
2. Polsky, E.A. Technological support of science intensive subassembly accuracy at life stages / E.A. Polsky, O.A. Nikonov, N.S. Mitrakov, F.D. Zvyagintsev // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. – 2017. – No.8. – pp. 328-338.
3. Reshetov, D.N. *Parts and Mechanisms of Machine-Tools* / D.N. Reshetov. – М.: Mechanical Engineering, 1972. – Vol.1. – pp. 664.
4. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Surface Layer of Parts* / A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.
5. Ryzhov, E.V. *Technological Support of Machinery Operating Properties* / E.V. Ryzhov, A.G. Suslov, V.P. Fyodorov. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 176.

- / И.А. Коганов, А.П. Никифоров, В.Л. Балашов [и др.]. – М.: ВНИИНМАШ, 1982. – С. 61.
9. Каталог компании «SBC» по производству линейных направляющих и ШВП. – С. 28.
10. Лурье, А.М. Рельсовые направляющие качения. Характеристики продукции разных производителей. Рекомендации по применению: обзор. исслед. / А.М. Лурье; ОАО «ЭНИМС», ЗАО «Сервотехника». – 2006. – С. 50.

6. *Catalogue of Company "HIWIN" for Linear Guide Manufacturing*. – pp. 147.
7. Ivanov, A.S. Computation method for joints with tightness in general loading case / A.S. Ivanov, M.M. Yermolaev, S.K. Rudnev // *Efficient Technologies and Systems of Mechanical Engineering*. – 2015. – Issue 1. – pp. 75-83.
8. MR 32-82. *Dimensional Chains: Tolerances Computation Taking into Account Contact of Mated Parts* / I.A. Koganov, A.P. Nikiforov, V.L. Balashov [et al.]. – М.: AURIMach, 1982. – pp. 61.
9. *Catalogue of Company "SBC" for Manufacturing Linear Guides and SVP*. – pp. 28.
10. Lourier, A.M. *Rail Rolling Guides. Produce Characteristics of Different Manufacturers. Recommendations for Use: review of researches* / A.M. Lourier; PC "ENIMS", CC "Servotechnics". – 2006. – pp. 50.

Статья поступила в редакцию 12.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного университета
Ивахненко А.Г.

Статья принята к публикации 25.12.18.

Сведения об авторах:

Федуков Александр Григорьевич, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: fedukov.lvdu@gmail.com.

Хандожко Александр Владимирович, д.т.н., нач. отдела лаборатории ВДКУ Брянского государственного технического университета, e-mail: chandosh@yandex.ru.

Fedukov Alexander Grigorievich, Post graduate student, Bryansk State Technical University, e-mail: fedukov.lvdu@gmail.com.

Khandozhko Alexander Vladimirovich, Dr. Sc. Tech., Chief of the Dep. of VDKU Lab, Bryansk State Technical University, e-mail: chandosh@yandex.ru.

Польский Евгений Александрович, к.т.н., зав. кафедрой «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: polskiy_tm_2017@mail.ru.

Щербakov Андрей Николаевич, д.т.н., зав. кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, e-mail: taiga78@list.ru.

Polsky Evgeny Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Head of the Dep. "Engineering Technique", Bryansk State Technical University, e-mail: polskiy_tm_2017@mail.ru.

Shcherbakov Andrey Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Head of the Dep. "Machine-Tools and Tools", Bryansk State Technical University, e-mail: taiga78@list.ru.