

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ГАЙКИ И ШАГА РЕЗЬБЫ

О.Б. Королёва

korolyova.olg@gmail.com

SPIN-код: 7113-9997

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано распределение нагрузки по рабочим виткам в резьбовых соединениях. Рассмотрены различные типы гаек (сжатия, растяжения и растяжения-сжатия), изучено влияние типа гайки и шага резьбы на распределение нагрузки по виткам. Описан механизм действия упругих деформаций винта и гайки для каждого из трех вариантов нагружения. Приведены и проанализированы результаты исследований ведущих ученых в этой области и предложенные ими варианты решений данной задачи. Составлена и решена система уравнений для определения доли нагрузки, которую испытывает каждый виток резьбы при использовании гаек различной формы. Построены необходимые графические характеристики, наглядно отражающие распределение нагрузки по рабочим виткам резьбы в зависимости от формы гайки и шага резьбы. Результаты проведенной работы проанализированы и сопоставлены с результатами другого исследования, что свидетельствует о хорошей сходимости и достоверности полученных данных.

Ключевые слова

Винт, гайка, рабочая поверхность резьбы, сближение, контактная податливость

Поступила в редакцию 18.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что при определении прочностных качеств и надежности машин, а также их массы и стоимости часто не учитывают влияние конструкции, свойств материалов и других параметров резьбовых соединений, от которых зависит распределение нагрузки по виткам резьбы. Принимаемое в обычных расчетах допущение о равномерном распределении нагрузки по виткам не соответствует действительным условиям работы резьбы. На практике уже давно установлено, что в резьбовых соединениях рабочие витки неравномерно воспринимают осевую растягивающую нагрузку. Нижние витки нагружаются сильнее, и наибольший процент обрывов болтов происходит именно в этом месте. Причина такого неравномерного распределения нагрузки заключается в том, что упругие деформации болта и гайки различны по направлению: тело болта под воздействием сил затяжки и рабочих нагрузок растягивается, а тело гайки сжимается. Разность деформаций вызывает дополнительный изгиб витков, в результате первые (от опорной поверхности

гайки) витки резьбы болта с приложением нагрузки ложатся на первые витки гайки и берут на себя бóльшую часть нагрузки [1, 2].

Согласно теоретическим и экспериментальным данным, первый виток несет примерно 30 % всей нагрузки. На следующих витках деформация и напряжения растяжения стержня уменьшаются по мере передачи силы от стержня на гайку. Уменьшается и деформация сжатия в гайке, поэтому нагрузка на каждый последующий виток снижается [3, 4].

Данная задача о распределении нагрузки по виткам резьбы была исследована Н.Е. Жуковским в 1902 г. Для упрощения расчетов он рассматривал резьбовое соединение как совокупность кольцеобразных выступов с прямоугольным сечением, работающих только на срез [5]. Последующие исследования данного вопроса касались преимущественно уточнения расчетной схемы, что позволило получить более точный закон распределения нагрузки по рабочим виткам резьбы. Особо следует выделить работы И.А. Биргера, впервые решившего задачу для соединения, образованного непрерывными витками резьбы, с учетом их податливости [6].

Исследования по влиянию контактных деформаций на распределение нагрузки по виткам резьбы проводил также В.Б. Куклин [7]. Он изучал влияние микронеровностей поверхности резьбы на ее податливость путем проведения испытаний на моделях резьбы М18 и М30. В.Б. Куклин показал, что если нарезанная резьба имеет параметр шероховатости $Ra \geq 1,6$ мкм, то основное влияние на податливость резьбы оказывает не изгиб витков, а контактная податливость рабочей поверхности витков.

При конструировании нужно стремиться к равномерному распределению нагрузки по рабочим виткам. Следует различать резьбовые соединения, у которых гайка работает на сжатие и на растяжение.

Если к соединению с гайкой сжатия приложить нагрузку, то болт растянется на величину Δ_1 , а гайка сожмется на величину Δ_2 , т. е., как уже было отмечено выше, возникнут противоположные по знаку деформации. Первые (от опорной поверхности гайки) витки болта будут соприкасаться с первыми витками гайки и воспринимать бóльшую часть приложенной нагрузки.

Для равномерного распределения нагрузки по виткам резьбы необходимо, чтобы направление деформации гайки совпадало с направлением деформации стержня. Для этого используют гайки другой формы, опорная поверхность которых выше последнего витка. Тогда тело гайки, расположенное под опорной поверхностью, будет испытывать растяжение, а деформация витков гайки будет сонаправлена с деформацией витков стержня. В настоящее время такие гайки, называемые гайками растяжения, используют в ответственных резьбовых соединениях в машиностроении. Таким образом, гайки растяжения обеспечивают вполне равномерное нагружение витков.

Полурастянутые гайки имеют меньшие размеры, чем гайки растяжения, и также широко применяются в ответственных резьбовых соединениях. В полурастянутой гайке опорная поверхность расположена между первыми и послед-

ними витками, т. е. примерно посередине резьбового пояса, нижняя часть которого работает на растяжение. Верхние витки подвергаются всестороннему сжатию, вызванному упругой деформацией верхней части гайки. Таким образом, силы реакции на опорных поверхностях давят на верхние витки, сжимая их в поперечном направлении, и уменьшают нагрузку на нижние витки.

Чтобы определить, какую нагрузку испытывает каждый виток резьбы при использовании гаек различных форм, обратимся к составленному Н.Е. Жуковским [5] условию совместности деформаций болта и гайки:

$$\begin{aligned}
 F &= F_1 + \dots + F_i + \dots + F_n; \\
 \delta_1 - \delta_2 &= \Delta_{11} + \Delta_{21}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \delta_i - \delta_{i+1} &= \Delta_{1i} + \Delta_{2i}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \delta_{n-1} - \delta_n &= \Delta_{1(n-1)} + \Delta_{2(n-1)},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где F_i — нагрузка на i -й виток; δ_i — сближение в i -м витке; n — число витков гайки; Δ_{1i} — удлинение тела винта между i -м и $(i + 1)$ -м витками,

$$\Delta_{1i} = P \sum_{i+1}^n \frac{F_i}{E_1 A_1};$$

укорочение тела гайки между i -м и $i + 1$ витками:

$$\Delta_{2i} = P \sum_{i+1}^n \frac{F_i}{E_2 A_2};$$

P — шаг резьбы; E_1 и E_2 — модули упругости материалов винта и гайки; A_1 , A_2 — площади поперечного сечения винта и гайки.

Решая систему уравнений (1), Н.Е. Жуковский получил распределение нагрузки по виткам, представляющее собой убывающую геометрическую прогрессию.

Решим систему n уравнений (1), предполагая, что сближение δ_i в i -м витке вызвано только контактной податливостью рабочей поверхности резьбы [8]. В работе [9] приведено ранее полученное авторами выражение, связывающее контактное сближения δ с контактным давлением p при повторных нагружениях:

$$\delta = Ra c_0^* \varepsilon \sqrt{\frac{p}{E^*}}.
 \tag{2}$$

Здесь $Ra = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}$ — приведенный параметр шероховатости; Ra_1 и Ra_2 — средние арифметические отклонения профиля сопрягаемых поверхностей; $c_0^* \approx 263$ — коэффициент, учитывающий взаимное расположение микронеров-

ностей; ε — масштабный фактор; E^* — приведенный модуль упругости, определяемый из соотношения

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2},$$

где E_1 и E_2 — модули упругости материалов контактирующих деталей; μ_1 и μ_2 — их коэффициенты Пуассона.

Масштабный фактор $\varepsilon = \delta/\delta_0$, где $\delta_0 = Ra c_0^* \sqrt{p/E^*}$ — сближение контактных поверхностей, наибольший размер $L_0 = 50$ мм которых выбран за эталон. Масштабный фактор зависит от наибольшего размера L поверхности контакта и учитывает влияние высоты W_{\max} волны шероховатой поверхности, а также отклонения Δ формы. При $L \leq L_0$ принимают $\varepsilon = L/L_0$. После введения замены

$c = \frac{Ra c_0^*}{\sqrt{E^*}}$ формула (2) преобразуется к виду

$$\delta = c\varepsilon\sqrt{p}, \quad (3)$$

поэтому сближение δ_i в i -м витке определяют по формуле

$$\delta_i = c\varepsilon\sqrt{\frac{F_i}{A_p}}, \quad (4)$$

где A_p — площадь опорной поверхности витка.

Нами была решена нелинейная система уравнений (1) и (4) для гайки сжатия. Для гайки растяжения в формулах системы (1) знак «+» перед вторым слагаемым заменили знаком «-», получив следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \delta_1 - \delta_2 &= \Delta_{11} - \Delta_{21}; \\ &\dots\dots\dots; \\ \delta_i - \delta_{i+1} &= \Delta_{1i} - \Delta_{2i}; \\ &\dots\dots\dots; \\ \delta_{n-1} - \delta_n &= \Delta_{1(n-1)} - \Delta_{2(n-1)}. \end{aligned}$$

Используя данные системы уравнений, сравним полученные нами результаты (сплошная линия на рисунке) с результатами исследований Н. Wiegand [10]. В своих работах он рассматривал гайку M12 сжатия и полурастяжения с шестью и девятью рабочими витками соответственно. Также им были проведены исследования влияния шага резьбы на распределение нагрузки. В своих опытах он использовал гайки M24 и M24×1,5. Конечные результаты его работ показаны на рисунке штриховой линией.

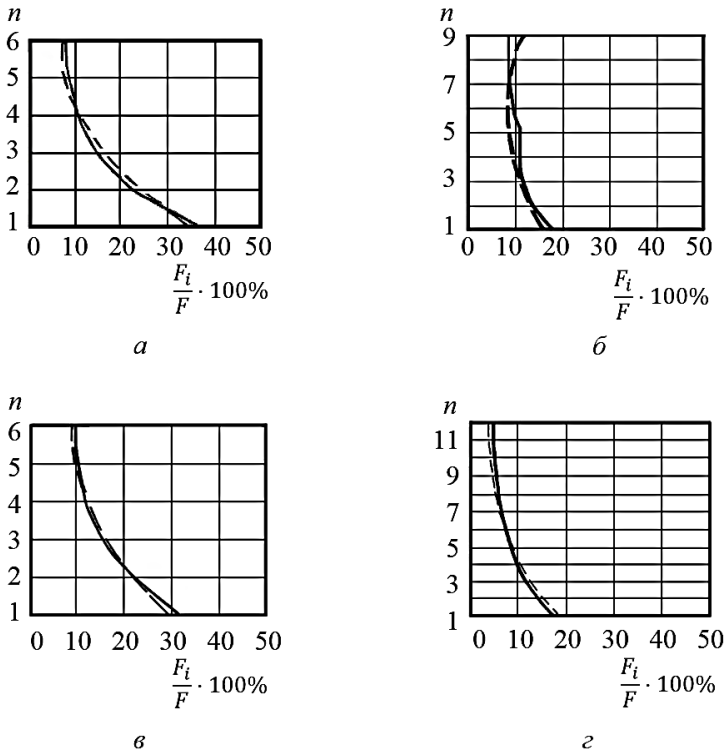


Рис. 1. Распределение нагрузки по виткам резьбы (сплошные линии — результаты расчета по формулам (1) и (4), штриховая линия — результаты исследований, опубликованные в работе [10]):

a — гайка сжатия М12 с шестью рабочими витками; *б* — гайка растяжения-сжатия М12 с девятью рабочими витками; *в* — гайка сжатия М24; *г* — гайка сжатия М24×1,5

Проанализировав графики, можно сделать вывод, что сходимость результатов является достаточно хорошей: полученные зависимости совпадают с результатами Н. Wiegand. Анализ результатов расчета позволяет заключить, что гайка растяжения-сжатия обеспечивает более равномерное распределение нагрузки по виткам, чем гайка сжатия. Применение резьбы с мелким шагом (при сохранении высоты гайки) также уменьшает неравномерность распределения нагрузки по виткам резьбы. Последнее позволяет ожидать увеличения долговечности резьбового соединения с мелкой резьбой.

Литература

[1] *Детали машин: учебник для вузов* / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; под ред. О.А. Ряховского. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 520 с.
 [2] Дунаев П.Ф. *Конструирование узлов и деталей машин*. Москва, Издательский центр «Академия», 2009, 496 с.
 [3] Шелюфаст В.В. *Основы проектирования машин*. Москва, Изд-во АПМ, 2005, 471 с.
 [4] Захаров М.Н. *Прочностная надежность оборудования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 123 с.

-
- [5] Жуковский Н.Е. Распределение давлений в нарезках винта и гайки. *Бюллетень Политехнического общества*, 1902, № 1, с. 1–3.
- [6] Биргер И.А. *Расчет резьбовых соединений*. Москва, Оборонгиз, 1959, 252 с.
- [7] Куклин В.Б. Уточнение расчетов резьбовых соединений. *Вестник машиностроения*, 1957, № 7, с. 24–30.
- [8] Иванов А.С., Байков Б.А., Щеголев Н.А. Уточнение распределения нагрузки в резьбовом соединении по виткам резьбы путем учета их контактной жесткости. *Вестник машиностроения*, 2004, № 4, с. 20–23.
- [9] Иванов А.С., Муркин С.В. *Расчет и проектирование резьбовых соединений приводов*. Москва, Инновационное машиностроение, 2015, 108 с.
- [10] Wiegand H., Illgner K.-H. *Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen*. Berlin, Springer, 1962, 146 s.

Королёва Ольга Борисовна — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Иванов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

LOAD DISTRIBUTION BETWEEN THREADS OF A BOLTED JOINT DEPENDING ON THE NUT TYPE AND THREAD LEAD

O.B. Koroleva

korolyova.olg@gmail.com

SPIN-код: 7113-9997

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study deals with load distribution between engaged threads in bolted joints. We consider various types of nuts (compression nuts, tension nuts and combined tension and compression nuts) and investigate effects that nut type and thread lead have on the load distribution between threads. We describe the mechanism behind elastic strain in the bolt and nut for each of the three loading types. We present and analyse results of investigations conducted by the leading specialists in the field and the solutions to this problem that they suggest. We constructed and solved the system of equations that determines the share of the load affecting each thread when nuts of various shapes are used. We plotted the curves required to visually represent load distribution between engaged threads as affected by the nut shape and thread lead. We analysed the results of our study and compared them to the results of another investigation, which implies good convergence and reliability of the data obtained.

Keywords

Bolt, nut, threaded surface, convergence, contact compliance

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Andrienko L.A., Baykov B.A., Ganulich I.K., O.A., ed. by Ryakhovskiy. *Detali mashin* [Components of machines]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 520 p.
- [2] Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Designing components and machine parts]. Moscow, Akademiya, 2009. 496 p.
- [3] Shelofast V.V. *Osnovy proektirovaniya mashin* [Fundamentals of machine designing]. Moscow, APM Publ., 2005. 471 p.
- [4] Zakharov M.N. *Prochnostnaya nadezhnost' oborudovaniya* [Strength reliability of the equipment]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2011. 123 p.
- [5] Zhukovskiy N.E. *Raspredeleniye davleniy v narezках vinta i gayki* [Distribution of pressures on screw and nut nuts]. *Byulleten' Politekhnikeskogo obshchestva*, 1902, no. 1, pp. 1–3 (in Russ.).
- [6] Birger I.A. *Raschet rez'bovykh soedineniy* [Calculation of threaded connections]. Moscow, Oborongiz Publ., 1959. 252 p.
- [7] Kuklin V.B. *Utochneniye raschetov rez'bovykh soedineniy*. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 1957, no. 7, pp. 24–30 (in Russ.).
- [8] Ivanov A.S., Baykov B.A., Shchegolev N.A. *Utochneniye raspredeleniya nagruzki v rez'bovom soedinenii po vitkam rez'by putem ucheta ikh kontaktnoy zhestkosti*. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2004, no. 4, pp. 20–23 (in Russ.).

- [9] Ivanov A.S., Murkin S.V. Raschet i proektirovanie rez'bovykh soedineniy privodov [Calculation and design of threaded connections of drives]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2015. 108 p.
- [10] Wiegand H., Illgner K.-H. Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen. Berlin, Springer, 1962. 146 p.

Koroleva O.B. — Master's Degree student, Department of Machine Design Foundations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ivanov A.S., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Machine Design Foundations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.