

УДК 62.234:539.621:67.02
DOI:10.30987/2223-4608-2021-9-19-25

И.Ю. Цуканов, к.т.н.
(Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1)
E-mail: ivan.yu.tsukanov@gmail.com

Технологическое повышение долговечности внутренних винтовых поверхностей

Приведена методология и некоторые способы технологического повышения долговечности внутренних винтовых поверхностей. Для повышения долговечности предложены отделочно-упрочняющая финишная обработка пластическим деформированием и нарезание резьбы резцом с переменным средним диаметром. Приведены зависимости для назначения режимов обработки и результаты экспериментальных исследований параметров качества винтовой поверхности и износостойкости ходовых гаек.

Ключевые слова: винтовая поверхность; ходовая гайка; долговечность; износостойкость; поверхностное пластическое деформирование.

I.Yu. Tsukanov, Can. Sc. Tech.
(Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, 101-1, Prospekt Vernadskogo, Moscow, Russia, 119526)

Technological improvement of the durability of internal screw surfaces

The methods and some ways of technological improvement of the durability of internal screw surfaces are given. To increase the durability, finishing and strengthening machining with surface plastic deformation and threading with a cutter of a variable average diameter are proposed. The dependences for the specification of machining modes and the results of experimental studies of the screw surface quality parameters and wear resistance of running nuts are given.

Keywords: screw surface; running nut; durability; wear resistance; surface plastic deformation.

Винтовые пары трения скольжения используются для преобразования движения из вращательного в поступательное с высокой точностью при стесненных габаритах и существенной осевой нагрузке. Основными областями применения винтовых пар скольжения являются системы механизации крыла и хвоста летательных аппаратов; прокатные станы; прессы; испытательные стенды; металлорежущие станки.

Применение методов повышения надежности внутренних винтовых поверхностей прежде всего определяется типом винтового механизма. Выделяют три основных типа винтовых механизмов: кинематические, силовые и комбинированные.

Кинематические механизмы предназначены для передачи движения при незначительных нагрузках. Для них основными показателями качества является точность положения испол-

нительного органа, которая зависит от точности перемещения винтовых поверхностей. К кинематическим винтовым механизмам относятся приводы измерительного, медицинского оборудования, точных роботов и т.д. В них применяют в основном трапецеидальную и метрическую резьбу. Основными эксплуатационными свойствами для кинематических винтовых передач будут постоянство коэффициента (момента) трения в резьбе и износостойкость. Кинематические винтовые пары скольжения работают в граничном режиме трения при номинальном давлении $p \leq 1$ МПа и скорости скольжения $v \geq 0,05$ м/с. Наиболее применяемые материалы гаек – латуни и неметаллы, такие как капрон, полистирол и полиамид [1].

Силовые механизмы предназначены для передачи значительных усилий на исполнительный орган. Основными эксплуатацион-

ными свойствами данных механизмов являются: износостойкость и усталостная прочность витков резьбы. К силовым механизмам можно отнести домкраты, прессы, нажимные механизмы прокатных станков и т.д. Для силовых механизмов применяют трапецеидальный (при двусторонней нагрузке) и упорный (при односторонней нагрузке) профили резьбы. Такие пары трения работают при номинальном давлении $p \geq 5$ МПа, скорости скольжения $v \leq 0,05$ м/с, при граничном или сухом режиме трения. В качестве наиболее распространенных материалов гаек применяют прочные бронзы, например, БрА11Ж6Н6, БрА9Мц2Л [1].

К комбинированным механизмам относятся наиболее ответственные механизмы, обеспечивающие точное положение высоконагруженного исполнительного органа – приводы металлорежущих станков и роботов, механизмы управления аэродинамическими поверхностями летательных аппаратов. Основные показатели качества таких механизмов – высокая надежность (определяемая, в первую очередь, износостойкостью) и обеспечение точности перемещения. Винтовые пары данного типа работают при $1 < p < 5$ МПа и $v \geq 0,05$ м/с. Режим трения – граничный. В качестве материалов гаек применяются износостойкие оловянные бронзы (БрО10Ф1, БрО10С10), а также антифрикционные чугуны [1].

Исходя из анализа литературных данных можно сделать вывод, что для всех трех типов винтовых механизмов надежность винтовой пары в значительной степени определяется ее износостойкостью, которая будет складываться из износостойкости элементов пары – ходового винта и ходовой гайки.

Методика выбора методов повышения износостойкости внутренних винтовых поверхностей (винтовой поверхности ходовой гайки) в зависимости от различных факторов показана на рис. 1.

Одним из методов, позволяющих технологически повысить износостойкость внутренних винтовых поверхностей ходовых гаек является отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД).

Для механизмов кинематического и комбинированного типов ОУО ППД выполняется на отделочных и отделочно-упрочняющих режимах соответственно. При этом предполагается, что винтовая поверхность предварительно нарезана резцом или метчиком. Данный метод обработки позволяет повысить износостойкость поверхности за счет снижения высотных

параметров шероховатости, увеличения относительной опорной длины профиля шероховатости, увеличения микротвердости поверхностного слоя, а также создания в нем благоприятных сжимающих остаточных напряжений.

Кроме того, ОУО ППД внутренних винтовых поверхностей на отделочных и отделочно-упрочняющих режимах обладает важными преимуществами, такими как: отсутствие необходимости в специальном оборудовании, универсальность в отношении размеров обрабатываемых поверхностей и простота конструкции инструмента, что обуславливает его низкую себестоимость.

Для выполнения ОУО ППД внутренних винтовых поверхностей на отделочных и отделочно-упрочняющих режимах был разработан специальный роликовый инструмент, позволяющий проводить обработку на токарных станках (рис. 2).

Инструмент состоит из корпуса 1, обкатывающего ролика 2, установленного на радиально-упорном подшипнике 3. Ролик 2 имеет коническую рабочую поверхность с углом наклона равным половине угла профиля резьбы. Подшипник 3 закреплен на штоке 4, имеющем возможность перемещения во втулке 5, запрессованной в корпус 1. Шток имеет прямоугольный паз для ограничения силы деформирования с помощью установочного винта 6.

Обработка роликовым инструментом (см. рис. 2) производится следующим образом: резцедержатель станка поворачивается на угол, равный углу подъема резьбы ϕ . Корпус 1 устанавливается в резцедержателе станка и перемещается в направлении резьбового отверстия до соприкосновения с витком, как показано на рис. 3, а. С помощью лимба, установленного на резцедержателе, выставляется необходимая сила деформирования. Ее контроль может выполняться индикатором часового типа, установленным на противоположном торце корпуса инструмента. Производится обработка витков резьбы за один проход. Если необходимо осуществить обработку противоположной боковой стороны витка, ходовая гайка переставляется в патроне. Фотография, иллюстрирующая ОУО ППД ходовой гайки на токарном станке, показана на рис. 3, б.

Следует отметить, что обработка роликовым инструментом (см. рис. 2) возможна при наружном диаметре резьбы $D > 30$ мм и углах подъема резьбы $\phi < 5^\circ$. При $D < 30$ мм целесообразно применять раскатывание или комбинированную обработку метчиком раскатником.

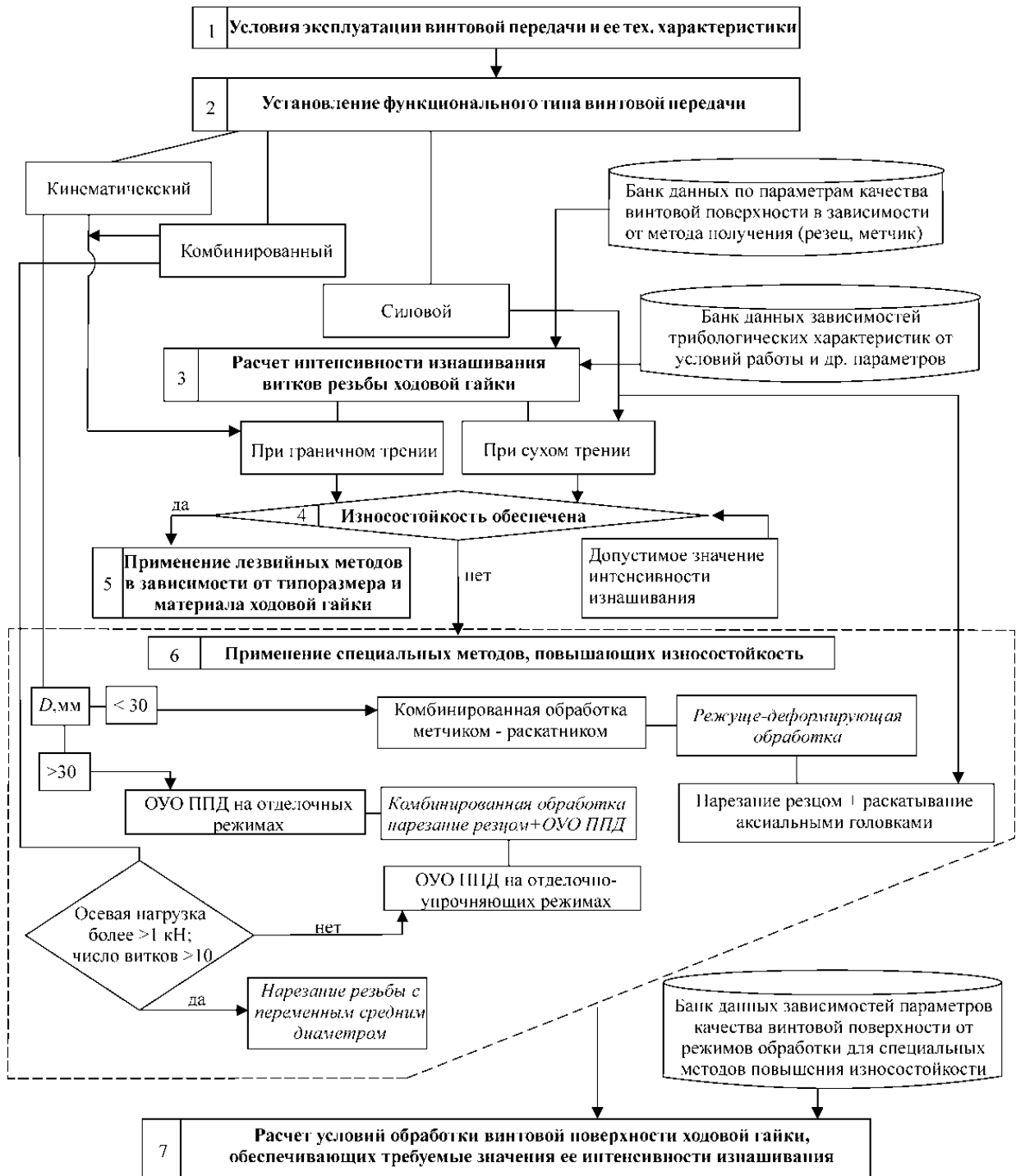
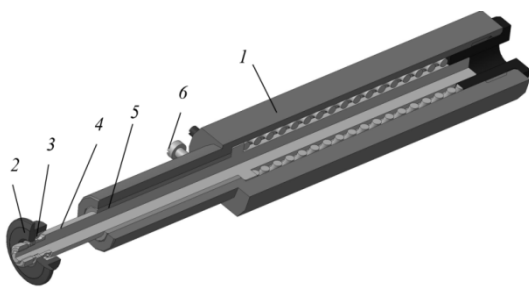


Рис. 1. Структурная схема методики технологического обеспечения износостойкости внутренних винтовых поверхностей



а)



б)

Рис. 2. Инструмент для ОУО ППД внутренних винтовых поверхностей ходовых гаек скольжения:
а – 3D модель; б – фотография

При ОУО ППД внутренней винтовой поверхности роликовым инструментом (см. рис. 2) происходит процесс качения с проскальзыванием, так как осуществляется контакт двух несогласованных поверхностей (внутренней винтовой поверхности и конической поверхности ролика), а обрабатываемый ролик установлен на опоре качения. Для назначения режимов обработки необходим расчет рабочего давления p в контакте инструмента и витка резьбы обрабатываемой гайки. Предполагая, что обработка производится в среде пластичного смазочного материала, влиянием сил трения на размер области контакта можно пренебречь.

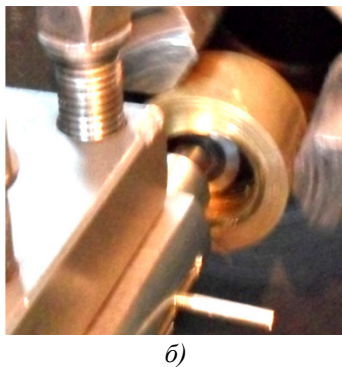
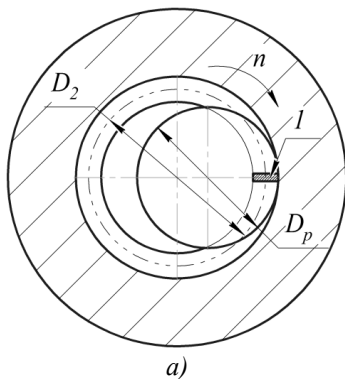


Рис. 3. Схема контакта (а) и фотография процесса обработки (б) при ОУО ППД ходовой гайки:

D_2 – средний диаметр резьбы; D_p – диаметр ролика; n – частота вращения гайки; l – область контакта витка гайки и ролика

Номинальная площадь контакта A_n , определяется упругими деформациями контактирующих тел (витка и ролика) и рабочей высотой профиля витка H , в допущении того, что при малом центральном угле дуги окружностей заменяются стягивающими хордами. Если обозначить ширину номинальной области контакта, образующейся в результате приложения к инструменту рабочей осевой нагрузки P_p , как $2a$, то номинальное давление p_n будет

определяться следующей зависимостью:

$$p_n = \frac{P_p}{A_n \cos(\alpha_n/2)} = \frac{P_p}{2Ha \cos(\alpha_n/2)}, \quad (1)$$

где α_n – угол профиля резьбы; H – рабочая высота витка резьбы (например, для трапециевидальной резьбы $H = 0,5P$, где P – шаг резьбы).

Контакт рабочих поверхностей ролика и витка резьбы в момент соприкосновения осуществляется по линии и близок к контакту конических поверхностей (рис. 4).

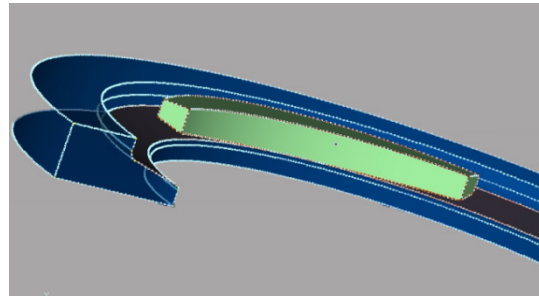


Рис. 4. Геометрическая модель контакта ролика и витка ходовой гайки

Контакт конических поверхностей аналогичен контакту цилиндрических поверхностей с радиусами, проведенными по нормали к контактирующим поверхностям. При приложении к инструменту рабочей нагрузки P_p образуется зона контакта шириной $2a$, которая определяется теорией Герца [2]:

$$2a = 4 \sqrt{\left(\frac{P_p R^*}{\pi E^* H \cos\left(\frac{\alpha_n}{2}\right)} \right)}, \quad (2)$$

где E^* , R^* – приведенные модуль упругости и радиус контактирующих тел, определяемые по следующим формулам:

$$R^* = \frac{1}{\frac{2 \sin(\alpha_n/2)}{D_p - 0,5H} - \frac{2 \sin(\alpha_n/2)}{D_2}}, \quad (3)$$

$$E^* = \frac{1}{\frac{(1-\nu_p^2)}{E_p} + \frac{(1-\nu^2)}{E}}, \quad (4)$$

где E_p , ν_p – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала ролика; E , ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала гайки. Следует отметить, что в формулах (1) – (4) все величины даны в системе СИ.

Рабочее давление p рассчитывается по формуле (1), при этом вместо номинальной площади контакта A_n используется значение фактической площади контакта A_f . Пренебре-

гая волнистостью и макроотклонением винтовой поверхности, вследствие малой номинальной площади контакта, фактическая площадь контакта при ОУО ППД рассчитывается по формуле [3]:

$$A_r = 0,5 A_n \left(\frac{h_{пл}}{3Ra_{исх}} \right)^2, \quad (5)$$

где $h_{пл}$ – величина пластических деформаций неровностей шероховатости, мкм, определяемая как [3]:

$$h_{пл} = \pi \left(\frac{\pi p_n Ra_{исх}}{H_{\mu 0}} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

где $Ra_{исх}$ – параметр шероховатости винтовой поверхности гайки после точения, мкм; $H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость резьбы после точения, МПа; p_n – значение номинального давления, МПа.

Назначение режимов обработки и теоретическое определение параметров качества поверхностного слоя после ОУО ППД внутренней винтовой поверхности может быть осуществлено, исходя из общей методологии для ОУО ППД [3]. При обработке на отделочных режимах $p < 1,5\sigma_T$; на отделочно-упрочняющих – $1,5\sigma_T < p < 3\sigma_T$, где σ_T – предел текучести материала ходовой гайки. Следует также отметить, что номинальное давление p_n не должно превышать $1,67\sigma_T$ во избежание течения материала гайки на макроуровне.

Экспериментальные исследования, проведенные на образцах-гайках из литейной бронзы Бр О10, внутренняя резьба ($Tr\ 36 \times 6$) в которых предварительно нарезана резцом ($Ra_{исх} = 1,5$ мкм; $Rz_{исх} = 7,5$ мкм; $tm = 25\%$; $H_{\mu 0} = 100$ МПа; $\sigma_T = 129$ МПа), показали, что применение ОУО ППД роликовым инструментом (см. рис. 2) при смазывании пластичной смазкой ЦИАТИМ 201 на отделочных режимах ($p = 180$ МПа) приводит к уменьшению параметра шероховатости Rz в 2,8 раза, увеличению относительной опорной длины профиля на уровне средней линии tm в 1,6 раза.

Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием на отделочно-упрочняющих режимах ($p = 197$ МПа) приводит к уменьшению Rz в 3,3 раза, увеличению tm в 1,72 раза и упрочнению поверхностного слоя витка со степенью $Uh = 17\%$. Следует также отметить, что

частота вращения гайки n (скорость обработки v_0) при ОУО ППД роликовым инструментом оказывает слабое влияние на параметры качества внутренней винтовой поверхности. При значительном увеличении скорости обработки степень упрочнения Uh падает, что связано с влиянием фрикционного разогрева в контакте ролика и винтовой поверхности.

Испытания образцов ходовых гаек (типоразмер резьбы $Tr\ 36 \times 6$) из бронзы Бр О10, проведенные на специальном стенде, имитирующем работу винтовой передачи, при осевой нагрузке 100 Н, скорости скольжения 0,16 м/с и смазывании пластичной смазкой ЦИАТИМ 201 показали, что средняя интенсивность изнашивания витков образцов-гаек, внутренняя винтовая поверхность которых после нарезания резцом дополнительно обработана ОУО ППД на отделочно-упрочняющих режимах ($p = 197$ МПа), уменьшилась в 1,6 раза по сравнению с образцами без ОУО ППД.

Для силовых винтовых механизмов с наружным диаметром резьбы $D > 30$ мм, работающих при высоких нагрузках, применение ОУО ППД на отделочно-упрочняющих режимах может быть недостаточно для обеспечения их надежности. Для повышения износостойкости и усталостной прочности витков ходовых гаек в данном случае применяют раскатывание роликами и режуще-деформирующую обработку с применением аксиальных головок [4]. Для обработки многозаходной резьбы, применяющейся в кинематических механизмах, применяют протягивание метчиком-протяжкой [4].

При режуще-деформирующей обработке внутренних резьб ходовых гаек основным условием обработки является припуск под раскатывание, определяющий силы деформирования и параметры качества поверхностного слоя винтовой поверхности. В настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния при накатывании и раскатывании резьб, а также степени упрочнения получаемой винтовой поверхности применяется компьютерное моделирование на основе метода конечных элементов [5, 6].

Основным недостатком рассмотренного метода ОУО ППД внутренних винтовых поверхностей роликовым инструментом является его низкая производительность, что ограничивает его использование в средне- и крупносерийном производстве. Известно [7], что при работе винтовой передачи нагрузка по виткам распределяется неравномерно, что приводит к быстрому износу первых и по-

следних (при реверсивной работе пары) витков.

Повысить износостойкость внутренней винтовой поверхности ходовой гайки и усталостную прочность ее витков можно за счет получения ходовой гайки с переменным шагом или средним диаметром резьбы при нарезании резцом. Получение резьбы ходовой гайки с переменным средним диаметром более технологично, чем резьбы с переменным шагом, вследствие того, что процесс нарезания последней на токарном станке с ЧПУ требует управления перемещением по угловой координате.

Приращение среднего диаметра должно обеспечивать равномерное (для механизмов с односторонней нагрузкой) или рациональное с точки зрения симметричности износа среднего витка (для механизмов с двухсторонней нагрузкой) распределение давлений по виткам.

Данный метод целесообразно применять для длинных ходовых гаек, имеющих более 10-и витков.

Были получены следующие выражения для расчета необходимого приращения среднего диаметра резьбы гайки $\Delta D_2(z)$ (где z – осевая координата винтовой линии) при различных случаях нагружения:

– при соотношении осевых нагрузок обратного и прямого хода $Q_{обр}/Q_{пр} = 0 \dots 0,3$:

$$\Delta D_2(z) = \frac{Q_{пр} \operatorname{ctg}(\alpha_n/2)}{E F_{\Gamma} H_{\Gamma}} z^2, \quad (7)$$

где F_{Γ} – площадь поперечного сечения гайки, м^2 ; E – модуль Юнга материала гайки, Па; H_{Γ} – высота гайки, м.

– при соотношении нагрузок $Q_{обр}/Q_{пр} = 0,7 \dots 1$:

$$\Delta D_2(z) = \begin{cases} z = 0 \dots \frac{H}{2} & - \frac{2Q_{обр} \operatorname{ctg}(\alpha_n/2)}{E F_{\Gamma} H_{\Gamma}} z^2 \\ z = \frac{H}{2} \dots H & \frac{2Q_{пр} \operatorname{ctg}(\alpha_n/2)}{E F_{\Gamma} H_{\Gamma}} z^2 \end{cases}. \quad (8)$$

– при соотношении нагрузок $Q_{обр}/Q_{пр} = 0,3 \dots 0,7$:

$$\Delta D_2(z) = \begin{cases} z = 0 \dots \frac{H}{2} & - \frac{Q_{обр} \operatorname{ctg}(\alpha_n/2)}{E F_{\Gamma} H_{\Gamma}} z^2 \\ z = \frac{H}{2} \dots H & \frac{8(Q_{пр} - Q_{обр})}{3E F_{\Gamma} H_{\Gamma}^2 \operatorname{tg}(\alpha_n/2)} z^3 + \frac{2Q_{обр}}{E F_{\Gamma} H_{\Gamma} \operatorname{tg}(\alpha_n/2)} z^2 - \frac{16\lambda S^2 (Q_{пр} - Q_{обр})}{E f_6 H_{\Gamma}^2 \operatorname{tg}(\alpha_n/2)} z \end{cases}, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{D \cdot H}{2 \cdot S^2} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_n}{2} \left(\nu + \frac{D_{\Gamma}^2 + D^2}{D_{\Gamma}^2 - D^2} \right)$; $S = P(0,366P + \operatorname{tg}(\alpha_n/2))$; D_{Γ} – наружный диаметр ходовой гайки; D – наружный диаметр резьбы; ν – коэффициент Пуассона материала гайки. В формулах (7) – (9) все величины даны в системе СИ.

Таким образом, средний диаметр резьбы будет определяться суммой стандартного значения и приращения $\Delta D_2(z)$, определяемого формулами (7) – (9). На рис. 5 показан пример графика приращения среднего диаметра резьбы ΔD_2 , рассчитанного по формуле (9), для ходовой гайки, имеющей 12 витков, в зависимости от номера витка N .

Кривая, показанная на рис. 5, соответствует случаю, при котором половина витков гайки работает при нагрузке прямого хода, а половина – при реверсивной нагрузке, при этом $Q_{обр}/Q_{пр} = 0,7$.

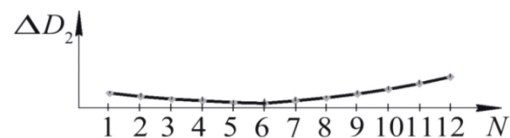


Рис. 5. Зависимость приращения среднего диаметра резьбы от номера витка для ходовой гайки, работающей при двухсторонней нагрузке

Рассмотренные в работе методология и конкретные технологические методы позво-

ляют повысить долговечность внутренних винтовых поверхностей ходовых гаек по критерию износа в зависимости от функционального назначения винтовой передачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Турпаев, А.И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 223 с.
2. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
3. Инженерия поверхности деталей / под. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Технология машиностроения. Методы обработки резьб: учеб. пособие. – М.: ФОРУМ, 2007. – 104 с.
5. Киричек, А.В., Афонин, А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
6. Цуканов, И.Ю. Моделирование упрочняющей обработки резьб ходовых гаек пластическим деформированием по предварительно нарезаемым канавкам // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – №11 (17). – С. 34-38.

7. Биргер, И.А., Иосилевич, Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 364 с.

REFERENCES

1. Turpaev, A.I. Screw Mechanisms and Gears.– М.: Mechanical Engineering, 1982. – 223 p.
2. Johnson, K. Contact Mechanics. – М.: Mir, 1989. – 510 p.
3. Surface Engineering of Parts / under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – 320 p.
4. Mechanical Engineering Technology. Thread Treatment Methods: manual. – М.: FORUM, 2007. – 104 p.
5. Kirichek, A.V., Afonin, A.N. Threading. Industrial Engineer's Library. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – 312 p.
6. Tsukanov, I.Yu. Modeling of Strengthening Treatment of Running Nut Threads by Plastic Deformation According to Pre-cut Grooves // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2012. – no.11 (17). – PP. 34-38.
7. Birger, I.A., Iosilevich, G.B. Threaded and Flanged Connections. – М.: Mechanical Engineering, 1990. – 364 p.

*Рецензент д.т.н.
Александр Николаевич Прокофьев*

