

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (10), 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 03.11.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,50. Уч.-изд. л. 9,30.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,

кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь);

Карташевич А. Н., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь);

Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь);

Томило В. А., доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 03.11.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,50.
Acc.-pub. s. l. 9,30. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A.V.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Милюкова А. М., Ционенко Д. А. Модель воздействия импульсного магнитного поля на изделие из титанового сплава

Булойчик И. А. Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы

Дубень И. В., Дремук В. А. Расчет числа витков пружин кручения

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом

Жигар В. И., Довгяло В. А., Моисеенко В. Л. Определение экономической эффективности практического применения методов повышения производительности звеносборочной линии КБ03

Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Булыга Д. М., Ковалевич В. С., Недвецкий С. В., Денисов В. А. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии

Михайлов М. И., Тетерич Н. Э., Воробей В. И. К вопросу о диагностике резцов по силе резания в условиях роботизированного технологического комплекса

Сиваченко Л. А., Абдукаликова Г. М., Сотник Л. Л., Дыдышко И. М. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов

Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения вала

Чаевский В. В., Кулешов А. К., Рудак П. В., Барчик С., Коледа П. Влияние ионно-плазменной обработки лезвий ножей на режущую способность фрезы при фрезеровании древесины

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Дубень И. В. Агротехническая и энергетическая оценка работы плужных корпусов с углоснимами

Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Исследование и разработка модели по оптимизации процесса разбрасывания удобрений

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tsionenko D. A. Model of impact of pulsed magnetic field on titanium alloy product

12 Bulochyk I. A. Analysis of changes in the structure formation of zinc-based intermetallic layers during galvanizing of heat-hardened steel products by diffusion method from the gas phase

17 Duben I. V., Dremuk V. A. Calculation of the number of torsion springs

24 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental study of the wear of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5, hardened by aerodynamic sound method

42 Zhihar V. I., Dovgualo V. A., Moiseenko V. L. determination of economic efficiency of practical application of methods for improving the productivity of the link assembly line KB03

51 Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. Hydro-abrasive technology for cleaning metal surfaces of propellers from corrosion

60 Mikhailov M. I., Teterich N. Э., Vorobei V. I. To the question of cutters diagnostics by cutting force in conditions of a robotic technological complex

67 Sivachenko L. A., Abdalikova G. M., Sotnik L. L., Dydyshko I. M. Problems, tasks and ways of development of spring technological apparatus

78 Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Analysis of the throughput of a vibrating grinder with variable parameters of the roll movement

88 Chayevski V. V., Kuleshov A. K., Rudak P. V., Barcik Š., Koleda P. The effect of ion-plasma treatment of the blades on the cutting ability of the milling cutter during wood milling

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

95 Duben I. V. Agrotechnical and energy assessment of the work of plough bodies with trashboard

102 Krupenin P. Y. Analysis of the phase portrait of milking machine pulsations

108 Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V. Research and development of a model for optimizing the fertilizer spreading process

УДК 62-272.22

И. В. Дубень¹, кандидат технических наук, доцент;
В. А. Дремук², кандидат технических наук, доцент

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ¹+375 (29) 824 26 49, duben_i_v@mail.ru, ²drvl@tut.by

РАСЧЕТ ЧИСЛА ВИТКОВ ПРУЖИН КРУЧЕНИЯ

Известные выражения для расчета необходимого числа витков пружин кручения являются приближенными и не учитывают физико-механических свойств материала, из которых изготавливаются пружины. Предложена формула для расчета числа витков, которая учитывает необходимое и достаточное число параметров — допустимое напряжение на изгиб и модуль упругости материала пружины, а также показатель деформации кручения — предельный угол закручивания. Расчет числа витков по предлагаемой формуле обеспечивает наиболее точное выполнение условия прочности пружины при предельной нагрузке.

Ключевые слова: пружина кручения; сталь пружинная; число витков; напряжение изгиба; момент кручения; угол закручивания.

Рис. 2. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

I. V. Duben¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;
V. A. Dremuk², PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voikova Str., 225401 Baranovichi,
the Republic of Belarus, ¹+375 (29) 824 26 49, duben_i_v@mail.ru, ²drvl@tut.by

CALCULATION OF THE NUMBER OF TORSION SPRINGS

It has been established that the known expressions for calculating the required number of turns of torsion springs are approximate and do not take into account the physical and mechanical properties of the material from which the springs are made. Based on the analysis of loading, a formula for calculating the number of turns is proposed. It takes into account the necessary and sufficient number of parameters — the permissible bending stress and the elastic modulus of the spring material, as well as the torsional deformation index — the limiting angle of twisting. The calculation of the number of turns according to the proposed formula provides the most accurate fulfillment of the spring strength condition at the maximum load.

Key words: torsion spring; spring steel; number of turns; bending stress; torsional moment; twist angle.

Fig. 2. Table 2. Ref.: 3 titles.

Введение. При практических расчетах по выбору пружин кручения возникает задача определения сразу нескольких параметров — диаметра проволоки, среднего диаметра пружины, числа витков n и других — при наличии конструктивных ограничений на наружный и внутренний диаметры пружины, начальный (установочный) и максимальный рабочий моменты кручения. Известные методики расчета числа витков пружин [1; 2], учитывающие различные параметры, могут привести к отличающимся результатам, что приводит к необходимости повторения расчетов для пружин с другими параметрами.

Помимо пружинной стали (60С2, 50ХФА и т. п.) пружины изготавливаются из нержавеющей сталей (12Х18Н10Т, ХН77ТЮР и т. п.) и других материалов с различными физико-механическими свойствами. Поэтому уже на стадии предварительного расчета числа витков бывает необходимо в полной мере учитывать механические и прочностные свойства материала пружин с необходимым запасом прочности.

Материалы и методы исследования. Исходными данными для выбора пружин кручения являются:

- класс и разряд пружины;
- физико-механические свойства материала — модуль упругости материала E , допускаемые касательное напряжение кручения $[\tau_3]$, на изгиб $[\sigma_{изг}]$ и смятие $[\sigma_{см}]$ (МПа);
- установочный и максимальный рабочие моменты кручения M_1 и M_2 (Н · мм);
- рабочий ход пружины $\Delta\alpha$ или значения установочного и максимального рабочего углов закручивания α_1 и α_2 (град);
- допустимые интервалы геометрических размеров пружины — диаметра проволоки d , среднего D , наружного D_1 и внутреннего D_2 диаметров, длины пружины в свободном состоянии L_0 (мм).

При работе пружины кручения в поперечных сечениях витков возникает момент M , равный внешнему моменту, закручивающему пружину, вектор которого направлен вдоль осевой линии пружины. При разложении момента M по осевой линии витка пружины и перпендикулярному ему направлению в поперечном сечении витка пружины возникают напряжения изгиба $\sigma_{изг}$ и кручения $\tau_{кр}$. Так как изгибающий момент при угле подъема винтовой линии, не превышающем $12...15^\circ$, значительно больше крутящего, то пружины кручения рассчитывают только на изгиб, при этом допускаемое напряжение проволоки пружины на изгиб рекомендуется принимать равным $[\sigma_{изг}] = 1,25 [\tau_{кр}]$, где $[\tau_{кр}]$ — допускаемое напряжение материала проволоки на кручение.

Необходимое число витков n при предварительных расчетах можно определить по следующим выражениям:

- 1) по требуемой жесткости пружины $k_{кр}$ [2] —

$$n = k_{кр1} / k_{кр}, \quad (1)$$

где $k_{кр1}$ — жесткость на кручение одного витка, Н · мм / град;

$k_{кр}$ — требуемая жесткость всей пружины, Н · мм / град;

$$k_{кр} = \frac{(M_2 - M_1)}{\Delta\alpha} = \frac{M_3}{\alpha_3}, \quad (2)$$

где M_3 — предельный момент кручения при угле закручивания α_3 , при котором напряжения на изгиб $\sigma_{изг}$ достигают предельного значения $[\sigma_{изг}]$ (рисунок 1).

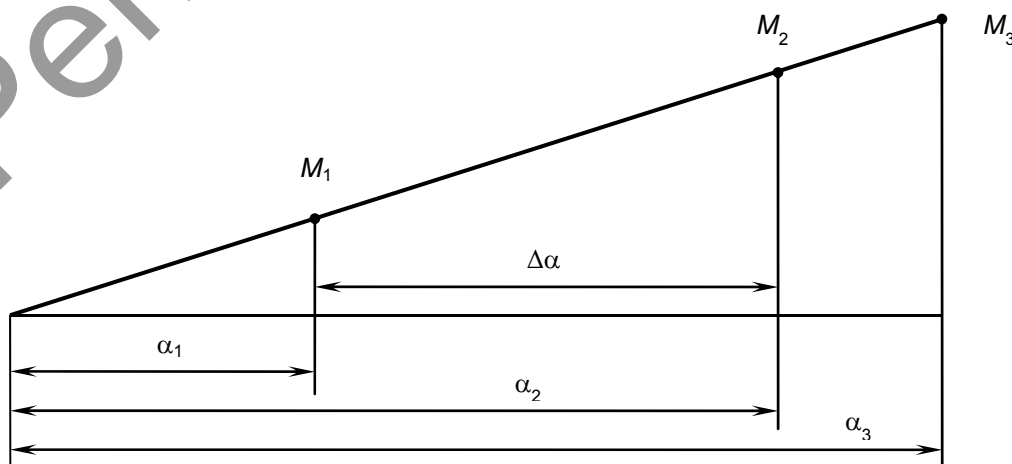


Рисунок 1. — Параметры пружины кручения

При этом рабочий ход пружины $\Delta\alpha$ (град):

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2,$$

где α_1 — начальный (установочный) угол закручивания, соответствующий моменту M_1 ;
 α_2 — максимальный рабочий угол закручивания, соответствующий моменту M_2 .

Предельный угол закручивания α_3 , согласно [1, с. 252], рекомендуется принимать равным $1,25\alpha_2$, при котором напряжение на изгиб $\sigma_3 = [\sigma_{изг}]$. Число 1,25 рассматривается, очевидно, как коэффициент запаса угла закручивания пружины относительно максимального рабочего угла α_2 .

В результате получим:

$$n = \frac{k_{кр1}\Delta\alpha}{M_2 - M_1} = \frac{k_{кр1}\alpha_1}{M_1} = \frac{k_{кр1}\alpha_2}{M_2}. \quad (3)$$

Формула (3) требует предварительного определения жесткости всей пружины кручения $k_{кр}$ и одного витка $k_{кр1}$ (Н · мм / град), а также не учитывает параметры предельного нагружения пружины и ее прочностные свойства;

2) выражение для расчета числа витков по формуле [1]

$$n = \frac{54,5 \Delta\alpha d^3}{(M_2 - M_1) c}, \quad (4)$$

где $c = D / d$ — индекс пружины, которое с учетом выражения (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$n = \frac{54,5 d^4}{k_{кр} D}. \quad (5)$$

Выражение (5) также не учитывает прочностные свойства материалов пружин в их разнообразии;

3) приближительная формула для расчета числа витков по максимальному значению угла закручивания пружины [1, с. 252]:

$$n = \frac{1000 K_1 \alpha_2}{1,8c[\sigma_{изг}]}, \quad (6)$$

где K_1 — коэффициент формы сечения и кривизны витков (поправочный коэффициент Ваая) [2]:

$$K_1 = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0,615}{c}; \quad (7)$$

$[\sigma_{изг}]$ — допускаемое напряжение на изгиб, МПа (для пружин из стали 60С2 $[\sigma_{изг}] = 1\,200$ МПа [2]).

Формула (6) не учитывает предельные значения момента M_3 или угла закручивания α_3 , соответствующие предельному напряжению на изгиб $[\sigma_{изг}]$, которые в реальности могут значительно отличаться у разных материалов, применяемых для изготовления пружин (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Параметры некоторых марок пружинных сталей [3]

Марка стали	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль сдвига G , МПа	Модуль упругости материала пружины E , МПа	Допускаемое напряжение на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа
12Х18Н10Т	510	68 500	181 000	320
ХН77ТЮР	730	78 300	196 000	450
60С2А	1 270	82 000	212 000	500
65Г	980	84 000	215 000	430
50ХФА	1 470	85 000	218 000	470

В силу вышеизложенного для предварительного расчета количества витков необходимо использовать выражение, учитывающее геометрические размеры пружины, параметры предельного нагружения с определенным запасом прочности и физико-механические свойства материала, из которых она изготовлена, допускаемое напряжение на изгиб $[\sigma_{изг}]$ и модуль упругости E .

Согласно [2], жесткость пружины кручения

$$k_{кр} = 2,72 \cdot 10^{-4} \frac{E d^4}{D n}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости материала пружины, МПа.

Приравняем выражения (2), (8) и выразим число витков:

$$n = 2,72 \cdot 10^{-4} \frac{E d^3 \alpha_3}{M_3 c}.$$

С учетом выражения для индекса пружины ($i = D / d$) и выражения для диаметра проволоки [2]

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_3 K_1}{\pi [\sigma_{изг}]}} \quad (9)$$

в результате после преобразований получим:

$$n = 2,77 \cdot 10^{-3} \frac{E K_1 \alpha_3}{[\sigma_{изг}] c} \quad (10)$$

Детальное сравнение выражений (6) и (10) показывает, что в формуле (6) отношением (1 000 / 1,8) учтено осредненное значение модуля упругости $E_{ср}$ материала:

$$E_{ср} = \frac{1\,000}{1,8 \cdot 2,77 \cdot 10^{-3}} = 200\,562 \text{ МПа.}$$

С практической точки зрения важно, что предложенная формула (10) учитывает необходимое и достаточное число параметров — допустимое напряжение на изгиб $[\sigma_{изг}]$ и модуль упругости материала пружины E , характеризующие физико-механические свойства материала пружины, а также показатель деформации — предельный угол закручивания α_3 . Геометрические размеры одного витка пружины учитываются величинами индекса пружины c и поправочного коэффициента K_1 , определяемого значением индекса пружины по формуле (7).

Результаты исследования и их обсуждение. Для сравнения методов определения количества витков произведем расчет по формулам (1), (4), (6) и (10) для трех марок пружинной стали — 65Г, 50ХФА и 60С2А (таблица 2).

Т а б л и ц а 2. — Исходные данные и результаты расчетов по сравнению методов определения числа витков

Величина	Марка стали		
	65Г	50ХФА	60С2А
Установочный момент кручения M_1 , Н · мм	1 500		
Максимальный рабочий момент кручения M_2 , Н · мм	4 000		
Предельный момент закручивания M_3 , Н · мм	5 000		
Рабочий ход пружины $\Delta\alpha$, град	30		
Требуемая жесткость пружины кручения $k_{кр}$, Н · мм / град	100		
Установочный угол закручивания α_1 , град	10		
Наибольший рабочий угол закручивания α_2 , град	40		
Предельный угол закручивания α_3 , град	50		
Диаметр проволоки минимальный $d_{мин}$, мм (по формуле (9))	4,6	4,4	4,3
Диаметр проволоки принятый d , мм	5		
Средний диаметр пружины D , мм	50		
Жесткость кручения одного витка $k_{кр1}$, Н · мм / град	731		
Индекс пружины c	10,0		
Коэффициент формы сечения и кривизны витка K_1	1,145		
Расчетное число витков n :			
по формуле (1)	8,8	8,8	8,8
по формуле (4)	8,2	8,2	8,2
по формуле (6)	7,1	6,5	6,1
по формуле (10)	9,5	8,8	8,1
Предельный угол закручивания α_3 (град) при расчете числа витков:			
по формуле (1)	55	61	64
по формуле (4)	52	56	60
по формуле (6)	45	45	45
по формуле (10)	60	61	59

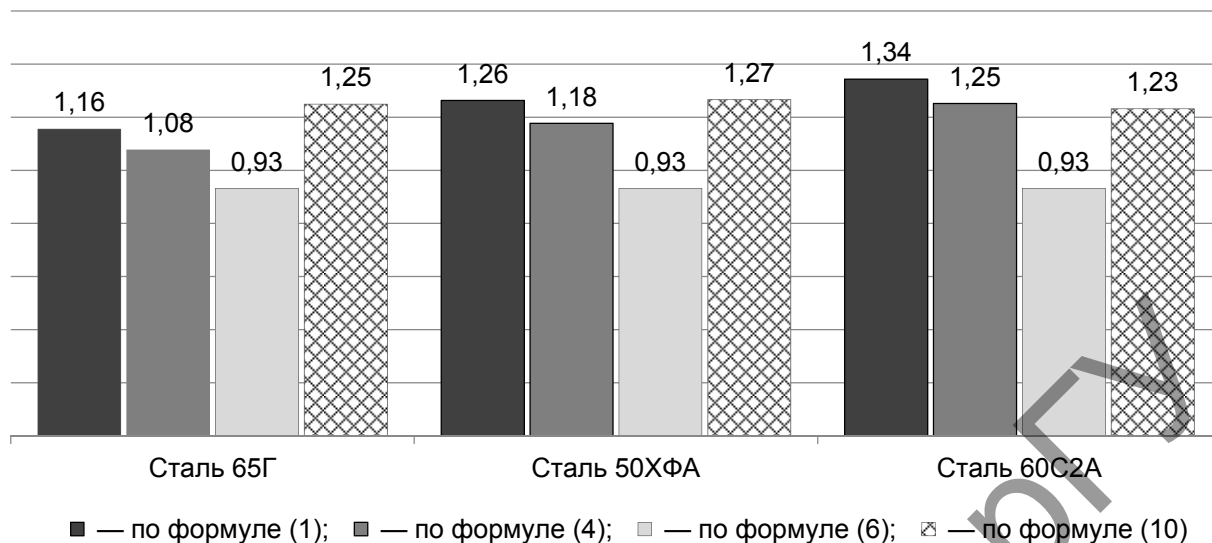


Рисунок 2. — Коэффициент запаса угла закручивания пружины относительно заданного значения α_3 при расчете числа витков пружины рассмотренными способами

В качестве критерия сравнения используем расчетную величину предельного угла закручивания:

$$\alpha_{3\text{расч}} = M_3 / k_{\text{кр}},$$

а также коэффициент запаса расчетного значения угла закручивания α_3 расчетного относительно заданного (см. таблицу 2):

$$K_\alpha = \alpha_{3\text{расч}} / \alpha_3.$$

Результаты расчетов показывают, что при учете прочностных характеристик материала, из которых изготовлена пружина, расчетное число витков n для близких по характеристикам материалов может существенно отличаться: при принятых значениях $[\sigma_{\text{изг}}] = 430 \dots 500$ МПа и $E = 212 \dots 215$ ГПа разница достигает 16 %.

Формулы (1) и (4) не учитывают прочностных свойств материала пружины. Формула (6) дает заниженное число витков, так как не учитывает предельное нагруженное состояние при моменте кручения M_3 , при этом расчетный предельный угол закручивания на 7 % меньше заданного (рисунок 2).

Следует заметить, что зачастую из конструктивных соображений число витков n после расчета округляется в большую сторону, поэтому при силовом и проверочном расчетах необходимо уточнить значения кинематических, силовых и геометрических параметров с учетом принятого числа витков.

Заключение. Расчет числа витков по предлагаемой формуле (10) обеспечивает наиболее точное выполнение условия прочности при предельной нагрузке $\sigma_3 \approx [\sigma_{\text{изг}}]$. В то же время отклонение установочного момента от заданного для исследованных типов пружин составляет $\Delta M_1 = -6 \dots +7$ %. Поэтому в случае, если требуется обеспечить строгое соответствие фактических моментов кручения заданным, то расчет целесообразно проводить для нескольких типов пружин кручения с последующим выбором пружины, обеспечивающей ближайшее к нулю значение отклонения момента от заданного.

Список цитируемых источников

1. *Анурьев, В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — М. : Машиностроение, 2001. — Т. 3. — 864 с.
2. Арматура трубопроводная. Пружины винтовые цилиндрические. Методика расчета [Электронный ресурс] : СТ ЦКБА 044-2010 : утв. 29.09.2010. — ЗАО «НПФ «ЦКБА». — Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/data2/1/4293813/4293813956#i11783> . — Дата доступа: 03.02.2021.
3. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 50753-95. — Введ. 09.03.1995. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026199> . — Дата доступа: 15.02.2021.

Поступила в редакцию 09.09.2021.

Репозиторий БарГУ