

ТЕСТУВАННЯ ГВИНТОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПРУЖИН СТИСКАННЯ

Кіслов О. Г., Рижков Ю. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі наведено теоретичне й експериментальне дослідження характеристик Гвинтових пружин стискання з однаковими геометричними параметрами з метою тестування. Визначено терміни та методiku вимірювань, зокрема термін «тверда висота» (solid height) як контрольна межа працездатності пружини. Подано матеріалознавчі аспекти добору та термічного оброблення сталі 60C2A (аустенітизація ~850 °C, гартування в маслі, високий відпуск 440–460 °C) для формування сорбіту відпуску з цільовою твердістю 49–53 HRC і стабільною жорсткістю. Результати експериментів узгоджуються з розрахунками в межах 6–8 %.

Ключові слова: пружина стискання, жорсткість, тверда висота, 60C2A, аустенітизація, сорбіт відпуску, тестування.

Вступ

Гвинтові циліндричні пружини стискання є одним із найважливіших елементів сучасного машинобудування. Вони здійснюють функції накопичення потенціальної енергії, демпфування ударів, компенсації коливань і забезпечення зворотного руху деталей після зняття навантаження. Пружини використовуються майже в усіх сферах техніки: у підвісках автомобілів, залізничному транспорті, авіаційних і космічних апаратах, у системах енергетичного машинобудування, а також у побутових пристроях. Популярність пружин пояснюється поєднанням простоти конструкції, компактності, відносно невисокої вартості виготовлення та здатності працювати в умовах значних і багаторазових навантажень.

Незважаючи на просту форму, пружина є складним пружним елементом, дія якого залежить від низки факторів: геометрії витків, властивостей матеріалу, умов термічного оброблення та експлуатаційного середовища. У багатьох випадках навіть незначне відхилення від нормативних параметрів може призвести до зниження терміну експлуатації вузла, де встановлена пружина, порушення роботи механізму або до аварійних ситуацій. Саме тому виникає потреба в проведенні як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Дослідження характеристик Гвинтових циліндричних пружин стискання за статичного навантаження є актуальними з декількох причин: по-перше, статичні випробування дозволяють визначати основні параметри пружини – її жорсткість, граничні навантаження та здатність до відновлення

після деформації; по-друге, результати таких досліджень є основою для подальших розрахунків у динамічних умовах, коли навантаження є змінним або циклічним; по-третє, випробування дають можливість перевірити якість виготовлення пружини та відповідність їхніх фактичних властивостей теоретично передбаченим. Крім цього, надійність пружини визначають мікроструктурні чинники (стан поверхні після шліфування/дробоструминного оброблення, масштаб зерна після відпуску, залишкові напруження), а також відповідність випробувальної методики чинним стандартам (ДСТУ, EN, ISO). Чітка дефініція «твердої висоти» (solid height, LcL_cLc) як контрольованого граничного стану запобігає експлуатаційним відмовам під час повного змикання витків.

Аналіз публікацій

У розрахунках пружин застосовувались традиційні перевірки міцності за нормованим коефіцієнтом запасу міцності або за допустимими напруженнями, що наведено у Aimin, Chanugin [1]. Л. Березін [2] розглянув уточнені залежності для розрахунку міцності та стійкості циліндричних пружин з урахуванням реальних граничних станів і похибок вимірювань, що релевантно для верифікації стендових випробувань. У [3] систематизовано лабораторні процедури вимірювання деформацій і жорсткості, зокрема з використанням прогиномірів і вимог до випробувальних машин. ДСТУ 8429:2015 [4] визначає вимоги до ресорно-пружинних сталей (хімічний склад, механічні властивості, твердості), які є основними для вибору дрота марки 60C2A. Стандарт ДСТУ EN 13906-1:2022 [5] (ідентичний

ЕН 13906-1:2013) регламентує розрахунок і проектування циліндричних спіральних пружин стискання, зокрема поняття твердості висоти та сили на твердій висоті як контрольованого граничного стану. ДСТУ ISO 8458-2:2007 [6] визначає вимоги до дрота для пружин. Узагальнення матеріалознавчих аспектів (структура сорбіту відпуску, ризику зневуглюцювання, залишкові напруження) наведено в [7], що важливо для узгодженості жорсткісної характеристики.

Мета та постановка задачі

Мета роботи – комплексне дослідження характеристик трьох зразків Гвинтових пружин стискання з однаковими геометричними параметрами для аналізу технічного стану, перевірки відповідності результатів випробувань теоретичним розрахункам і формулювання висновків щодо можливості їх використання в машинобудівних механізмах.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1) теоретичне дослідження – визначення деформації (осадки) пружини за дії статичного навантаження та підтвердження закону Гука;

2) експериментальні дослідження – випробування трьох пружин стискання з однаковими геометричними параметрами в лабораторії опору матеріалів;

3) порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень й аналіз точності розрахункових схем;

4) після вирішення цих завдань зроблені висновки про допустимі навантаження, матеріал і конструктивні особливості пружин, а також надані рекомендації щодо їх використання.

Виклад основного матеріалу

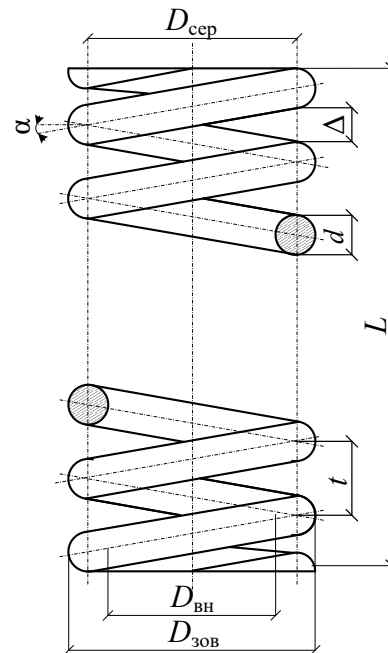
Загальні відомості. Пружини стискання виготовляються зі сталевих стрижнів (дротів) круглого поперечного перерізу. Дріт пружини може зазнавати кручення, зсуву та згинання. За малих кутів нахилу витків (до 15°) впливом згину можна нехтувати.

Пружини працюють відповідно до закону Гука: осьова сила пропорційна деформації. Їх поведінка залежить від діаметра витка, товщини дроту, матеріалу, шорсткості поверхні й умов термооброблення. Під час роботи пружини накопичують енергію деформації і повертають її під час розвантаження.

Матеріал пружин не відомий. Якщо пружини виготовлені з високовуглецевої сталі,

наприклад 60C2A, модуль пружності матеріалу пружини $G = 8 \cdot 10^4$ МПа.

Пружини стискання, що досліджуються, мають однакові геометричні параметри (рис. 1).



$L = 416$ мм – довжина; $D_{зов} = 50$ мм – зовнішній діаметр; $D_{вн} = 34$ мм – внутрішній діаметр; $D_{сер} = 42$ мм – середній діаметр; $d = 8$ мм – діаметр дроту; $n = 28$ – кількість робочих витків; $t = 14,57$ мм – відстань між осями витків; $\Delta = 6,57$ мм – зазор між витками; $\alpha = 10^\circ$ – кут нахилу витків

Рис. 1. Геометричні параметри

Наведемо характеристики пружини, які визначають її властивості:

– жорсткість, яка дозволяє визначати можливу деформацію пружини, залежно від сили стискання;

– межа навантаження, тобто сила стискання, яка в прямій пропорційності впливає на жорсткість пружини;

– висота пружини, яка визначає місце та спосіб її встановлення й кріплення в будь-якому механізмі.

Теоретичне дослідження. Розрахунок пружини стискання спрямований на визначення деформації (осадки) пружин за постійних геометричних параметрів та зміни величин навантаження.

Для визначення деформації пружини використовується формула

$$\lambda = \frac{8FD_{сер}^3}{Gd^4}n, \quad (1)$$

де λ – деформація (осадка) пружини, мм; F – прикладена осьова сила стискання, Н (ньютон); $D_{сер}$ – середній діаметр пружини, мм; d – діаметр дроту, мм; n – кількість робочих витків пружин. Впливає на жорсткість: чим більше витків, тим більш м'яка пружина. G – модуль зсуву матеріалу, МПа.

Деформація пружини обчислювалася за дії навантаження F , яка змінювалась від 500 до 4000 Н:

якщо $F_1 = 500$ Н, $\lambda_1 = 25,3$ мм;
 якщо $F_2 = 1000$ Н, $\lambda_2 = 50,7$ мм;
 якщо $F_3 = 2000$ Н, $\lambda_3 = 101,3$ мм;
 якщо $F_4 = 3000$ Н, $\lambda_4 = 152$ мм;
 якщо $F_5 = 4000$ Н, $\lambda_5 = 202,7$ мм.

Однак під час стискання пружини зазор між витками зменшується, тому була визначена довжина пружини (тверда висота) за повного замикавання витків, а також значення максимального зусилля, що стискає: $F_{max} = 3630$ Н.

Таким чином, у перерізі дроту пружини виникає дотичне напруження, яке обчислюється за формулою

$$\tau_{max} = \frac{8D_{сер}F_{max}}{\pi d^3}, \quad (2)$$

де τ_{max} , якщо дотичне напруження є максимальним; F_{max} , якщо сила стискання максимальна; $D_{сер}$, якщо діаметр пружини середній; d – діаметр дроту, та отримано $\tau_{max} = 760$ МПа.

Значення τ_{max} доводить, що випробувальні пружини виготовлені зі сталі 60С2А – конструкційної ресорно-пружинної сталі з високим вмістом вуглецю (0,6 %) та кремнію (1,2–1,6 %) (табл. 1) з межею міцності більше ніж 1550 МПа (табл. 2).

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 60С2А

Хімічний склад	Вміст, %
C	0,58–0,63
Si	1,2–1,6
Mn	0,5–0,8
Cr	≤ 0,25
Ni	≤ 0,25
Cu	≤ 0,25
S	≤ 0,35
P	≤ 0,35

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі 60С2А

Стан	Нормалізований	Загартування 840–860 °C (олія) + високий відпуск 440–460 °C (пружини))	Ізотермічне загартування 860–880 °C + сольова ванна 310–330 °C + відпуск 310–330 °C
Межа текучості, $\sigma_{0.2}$ (МПа)	600–800	1200–1400	1250–1450
Тимчасовий опір розриву, σ_v (МПа)	900–1100	1500–1700	1600–1800
Пластичність, δ_5 (%)	8–15	5–12	8–12
Ударна в'язкість, KCV (Дж/см ²)	30–50	25–45	30–55
Твердість, HRC	~15–27	45–52	44–50

Сталь 60С2А належить до вуглецевих пружних кремнієвмісних сталей з підвищеною пружністю й прокалюваністю, чутлива до перегріву та знеуглецювання. Для пружини з дроту 8 мм і зовнішнім діаметром 50 мм пріоритетним є отримання дрібнозернистого відпускового матеріалу (сорбіту відпуску) без суттєвого збільшення зерна та без зони вуглецювання, із кінцевою твердістю HRC 49,5–53 і стабільною пружною характеристикою.

Вихідні геометричні параметри дають холодну навивку з подальшим аустенітизуванням, гартуванням у маслі та високим відпуском.

Теоретичне дослідження дозволило визначити стискальне зусилля $F = 3500$ Н, за якого зазор між витками не вибирається, а дорівнює $\Delta = 0,24$ мм.

Однак у процесі завантаження пружини можлива втрата її поздовжньої стійкості, оскільки довжина пружини стискання у вільному стані велика у співвідношенні до середнього діаметра пружини $L/D_{сер} \approx 10$.

Висновок теоретичних досліджень: для нормальної роботи досліджуваної пружини стискання до неї можна прикладати максимальне зусилля $F = 3500$ Н, а для усунення можливої втрати поздовжньої стійкості конструкція пружини повинна мати поздовжній напрямний.

Експериментальні дослідження було проведено в лабораторії опору матеріалів кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського. Лабораторія має свідоцтво про відповідність системи вимірювань вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 №01-0106/2023 від 22.12.2023 (ДП «Харків-стандартметрологія»).

Дослідження трьох пружин стискання здійснювались на випробувальній машині Р-5, яку використовують для випробування металевих зразків на розтягання та стискання за найбільшого зусилля в 5000 Н та найбільшої відстані між захватами в 750 мм. Навантаження прикладалось механічним приводом. Перед випробуванням були виготовлені пристрої для закріплення пружин на нижній рухомій та верхній нерухомій опорних частинах машини, які фіксувались струбцинами.

Деформації (осадка) пружин вимірювались прогиноміром Максимова (ПМЗ), якій закріпленій на станині машини. Цей прилад має робочий шків, крізь який перекинутий сталевий дріт діаметром 0,5 мм. Одним кінцем він закріплювався до верху рухомої опори машини, а на другому кінці для його натягання підвішувалась гирька вагою 200 г. Вимірювання переміщень здійснювались з точністю до 0,01 см за двома шкалами.

На рис. 2 і 3 наведена випробувальна машина Р-5, прогиномір ПМЗ, пружина у вільному стані (рис. 2) та пружина в стиснутому стані (рис. 3).



Рис. 2. Пружина у вільному стані

Перше випробування продемонструвало, що за дії стискальної сили $F = 1500$ Н пружина почала втрачати поздовжню стійкість та вигинатися, тому випробування були зупинені.

Для усунення втрати поздовжньої стійкості та фіксації пружин були виготовлені та встановлені на машину такі пристрої: знизу внутрішній (стрижень), а зверху зовнішній (обойма) напрямні. Пружини та напрямні перед випробуванням змащувались машинним мастилом.

За допомогою цих пристроїв були проведені випробування трьох пружин стискання.

Пружини, що випробувались, завантажувались окремими кроками через $\Delta F = 500$ Н, а після кожного кроку навантаження покази ПМЗ фіксувались у протоколі випробування.



Рис. 3. Пружина в стиснутому стані

За максимального навантаження $F = 3500$ Н, вибирання зазору між вітками пружин не спостерігалось.

Потім пружини розвантажувались також окремими кроками й фіксувались відліки ПМЗ.

Результати спостережень були опрацьовані та побудовані графіки для кожної пружини з використанням програми Excel, що наведені на рис. 4. На цих графіках для порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень наведений графік, побудований відповідно до розрахунку пружини.

Згідно з графіками, за досягнення навантаження $F = 3500$ Н пружини отримали

таку максимальну осадку: $\lambda_1 = 167,25$ мм; $\lambda_2 = 168,87$ мм; $\lambda_3 = 164,15$ мм. Теоретична величина осадки має значення $\lambda = 177,26$ мм.

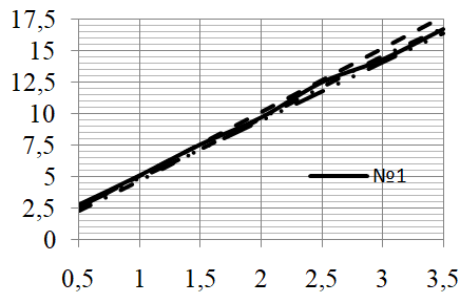


Рис. 4. Порівняння результатів теоретичних й експериментальних досліджень

Висновки

1) у роботі розглянуті характеристики гвинтових циліндричних пружин стискання;

2) теоретичне дослідження дозволило визначити величину допустимого навантаження $[F] = 3630$ Н та вибрати матеріал пружини стискання – високовуглецеву сталь 60С2А, а також обчислити максимальне значення сили $F = 3500$ Н, за якої не відбувається повного замикання витків пружини;

3) на етапі приймальних випробувань виготовлених пружин для перевірки відповідності жорсткості та відсутності залишкового «провалу» після розвантаження може бути прикладено стиск зусилля, що стискає, величиною $F = 3630$ Н;

4) під час випробувань пружин стискання було визначено, що пружини 1 і 2 незначною мірою більш жорсткі за пружину 3, а середня розбіжність результатів експериментальних і теоретичних досліджень становить 6–8 %, що дорівнює точності випробувань;

5) пружини, що досліджувались, можуть бути використані в механізмах машинобудування, де потрібні пружини стискання з високим ступенем відновлення їхньої форми після деформації, які працюють у режимах пружного навантаження.

Література

1. Aimin Y., Changjin Y. Formulation and evaluation of analytical studies for cylindrical helical spring. *Asta Mechanica Solida Sinica*. 2010. Vol. 23, №1, P. 85–4.
2. Березін Л. М. До розрахунків Гвинтових циліндричних пружин на міцність та стійкість. Наукові нотатки: міжвузівський збірник. Технічні науки. 2019. Вип. 67. С. 13–18.
3. Чихладзе Е. Д., Кіслов О. Г., Кітов Ю. П. Лабораторний практикум з опору матеріалів і

будівельної механіки. Харків: ХНАДУ, 2008. 228 с.

4. ДСТУ 8429:2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2016.
5. ДСТУ EN 13906-1:2022. Циліндричні спіральні пружини з круглого дроту та прутка. Розрахунок і проектування. Частина 1. Пружини стискання. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2022.
6. ДСТУ ISO 8458-2:2007. Дріт сталевий для механічних пружин. Частина 2. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
7. Бойко В. С., Кириченко С. А. Пружинні сталі та їх термічне оброблення: сучасні підходи. *Металознавство та термічне оброблення металів*. 2020. № 3. С. 18–25.

References

1. Aimin, Y., Changjin, Y. (2010). Formulation and evaluation of analytical studies for cylindrical helical spring. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 23, № 1, 85–94.
2. Berezin, L. M. (2019). On the calculations of helical cylindrical springs for strength and stability. *Scientific Notes (Technical Sciences)*, 67, 13–18.
3. Chikhladze, E. D., Kislov, O. G., Kitov, Yu. P. (2008). *Laboratory workshop on strength of materials and structural mechanics*. Kharkiv: KhNA-DU.
4. DSTU 8429:2015. Rolled carbon and alloy spring steels. Technical specifications. Kyiv: UkrNDNC.
5. DSTU EN 13906-1:2022. Cylindrical helical springs of round wire. Calculation and design. Kyiv: UkrNDNC.
6. DSTU ISO 8458-2:2007. Steel wire for mechanical springs. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
7. Boyko, V. S., Kyrychenko, S. A. (2020). Spring steels and their heat treatment: modern approaches. *Metallography and Heat Treatment of Metals*, 3, 18–25.

Кіслов Олександр Григорович, к.т.н., проф.

кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського,

тел. +38 067-661-02-54,

akislov548@ukr.net,

Рижков Юрій Володимирович, к.т.н., доцент

кафедри технології металів та матеріалознавства ім. Петриченка О. М.,

тел. +38 066-606-34-77,

ryzhkovyuriy.v@gmail.com.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Україна.

Testing of screw cylindrical compression springs

Abstract. Problem. The paper presents a theoretical formulation and an evaluative and experimental study of the characteristics of compression helical springs with identical geometric parameters for testing purposes. Even minor deviations in geometry, material properties or heat treatment regimes

can cause a noticeable decrease in stiffness, loss of dimensional stability and premature failure of elastic elements. In modern machine-building practice, ensuring the stability of the mechanical characteristics of springs made of carbon-silicon spring steels remains an important scientific and technical problem. The objective of this research is to perform a comprehensive theoretical and experimental investigation of the characteristics of helical compression springs with identical geometric parameters, to establish the dependence of their deformation on static load, and to verify the correlation between analytical and experimental results. The theoretical calculations were performed using the classical formula $\lambda = 8FD_{\text{mean}}^3 / (Gd^4)$, which describes the deflection of a spring as a function of the applied force, geometric parameters and the shear modulus of the material. The experimental tests of three compression springs were conducted in the certified laboratory of the Department of Bridges, Structures and Structural Mechanics named after V.O. Rossiyskyi of Kharkiv National Automobile and Highway University, using an R-5 universal testing machine with a maximum load of 50 kN and a Maksimov deflectometer (PM-3) for measuring displacements. The springs were made of 60C2A spring steel subjected to austenitizing at approximately 850 °C, oil quenching and high tempering at 440–460 °C, which ensured the formation of tempered sorbite with a hardness of 49–53 HRC and a stable elastic modulus. The theoretical results established a linear “load–deflection” relationship with a limiting load of 3.63 kN corresponding to the solid height condition. The experimental data confirmed the linearity of deformation within the operating range, and the deviation between theoretical and experimental results did not exceed 6–8 %, which agrees with the expected precision of bench testing. It was deter-

mined that for slender springs ($L/D \approx 10$) the use of guiding elements, such as a central rod or an outer sleeve, is required to prevent loss of longitudinal stability. The originality of this work lies in the combined analysis of theoretical, experimental and materials science aspects for compression springs made of 60C2A steel, including verification of the “solid height” (L_c) as a controlled limiting state and evaluation of the influence of microstructural factors such as decarburization, residual stresses and grain refinement on the elastic behaviour of the spring wire. The obtained results can be applied in production control and design calculations of compression springs for automotive and mechanical engineering applications, ensuring improved stiffness stability and fatigue resistance through adherence to optimal heat treatment modes (850 °C quenching and 440–460 °C tempering). The practical significance of the study consists in providing reliable recommendations for the manufacturing and testing of compression springs operating under static load conditions.

Key words: helical compression spring, stiffness, solid height, 60C2A steel, austenitizing, tempered sorbite, static testing, mechanical reliability.

Kislov Alexander, Ph.D., Prof. of the Department of Bridges, Structures, and Structural Mechanics name V.O.Rossiysky,
tel. +38 067-661-02-54,
akislov548@ukr.net,

Ryzhkov Yuriy, Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Metal Technology and Materials Science name O.M.Petrichenko,
tel. +38 066-606-34-77,
ryzhkovyuriy.v@gmail.com,
Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.