

УДК 621. 86

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ І БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ МАШИН

**І.Г. Міренський, проф., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній
університет**

Анотація. Запропоновано конструкцію пристрою для надійного кріплення дроту в зати-скачах розривної машини. Отримано аналітичні залежності зміння модуля пружності канатного дроту з урахуванням тимчасового опору та ряду факторів технологічного характеру.

Ключові слова: надійність машин, пружнопластичні властивості, звитий виріб, модуль пружності, тимчасовий опір розриву, хімічний склад сталі, технологічний процес.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ И СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

**И.Г. Миренский, проф., д.т.н., Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет**

Аннотация. Предложена конструкция приспособления для надежного крепления проволоки в зажимах разрывной машины. Получены аналитические зависимости изменения модуля упругости канатной проволоки с учетом временного сопротивления и ряда факторов технологического характера.

Ключевые слова: надежность машин, упругопластические свойства, витое изделие, модуль упругости, временное сопротивление разрыву, химический состав стали, технологический процесс.

INCREASING THE RELIABILITY OF LOAD-LIFTING AND ROAD- CONSTRUCTION MACHINES

**I. Mirenskiy, Prof., Dr., Eng. Sc.,
Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. A design of an attachment for reliable fastening the wire in the clamps of the breaking machine has been proposed. Analytical dependencies of variations of the rope-wire elasticity module with the account of temporary resistance and a number of technological factors have been obtained.

Key words: reliability of machines, elastic and ductile properties, spiral product, module of elasticity, temporary resistance to breaking, chemical composition of steel, technological process.

Вступ

Надійність роботи більшості типів вантажо-підіймальних і будівельно-дорожніх машин залежить від технічного стану їх механізмів і деталей, серед яких якість сталевих канатів має велике значення.

При конструюванні звитих виробів, виборі та обґрунтуванні силових і жорсткісних характеристик, а також визначенні раціональних параметрів попередньої деформації гнучких елементів у процесі звивання достовірність чисельного значення модуля пружності E та умовної границі текучості σ_s канатного дроту заслуговує на особливу увагу.

Таким чином, дана задача є актуальною та своєчасною, її вирішення сприятиме вдосконаленню технологічного процесу виготовлення звитого виробу із заданими пружними властивостями.

Аналіз публікацій

Незважаючи на проведені дослідження [1], присвячені визначенню модуля пружності дроту різних марок сталей, та припущення про наявність певної залежності між пружно-пластичними властивостями та його межею міцності [2], до сьогодні дана задача не отримала належного вирішення через відсутність об'єктивних експериментальних даних. Аналіз літературних джерел свідчить, що більшість вчених при вирішенні задач у галузі конструювання та технології виготовлення звитих виробів розглядають модуль пружності дроту $E = 200000$ МПа без урахування його технології та характеристики міцності вихідного матеріалу. Такий підхід викликає необхідність введення поправних коефіцієнтів, що значно ускладнює виконання розрахунків.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є удосконалення технологічного процесу виготовлення вихідного елемента сталевих канатів із заданими пружними властивостями на підставі виконаних досліджень при одноосьовому розтягу.

Для реалізації вказаної мети потрібно вирішити такі задачі:

- розглянути змінення границі текучості та модуля пружності дроту залежно від характеристики міцності;
- отримати математичну модель, що урахує вплив хімічного складу сталі та технологічних параметрів виготовлення на пружну характеристику дроту;
- виконати якісну оцінку пружно-пластичних властивостей з урахуванням кожного з факторів, що розглядається.

Вплив границі міцності та технологічних факторів на пружні властивості елементів сталевих канатів

Зазначені експериментальні дослідження при одноосьовому розтягу здійснювали на зразках сталевих дроту найбільш розповсюджених типорозмірів у канатному виробництві (0,15–2,6 мм) з межею міцності в діапазоні

1330–2850 МПа. Зразки дроту були виготовлені за такими технологічними схемами, зокрема: «загартування+електричний відпуск», бейнітування та патентування.

Технологію «загартування+електричний відпуск» розроблено Інститутом металофізики АН України. Сутність цього технологічного процесу полягає у використанні швидкісної електротермічної обробки звичайних вуглецевих сталей, при якій відбувається нагрівання дроту, що рухається, електричним струмом на двох ділянках. На першій ділянці заготовка нагрівається до температури 1000 °С, тобто вище критичної точки A_{c3} , та загартується в маслі з отриманням структури мартенситу. На другій ділянці здійснюється нагрів до температури 520–570 °С для відпуску мартенситу та формування дрібнодисперсної структури тонкопластинчастого перліту, який сприяє виготовленню канатного дроту високої міцності. За вказаною технологією були виготовлені зразки дроту з границею міцності $\sigma_{\text{тим}} = 1990\text{--}2180$ МПа.

Шляхом бейнітування були виготовлені зразки канатного дроту різного типорозміру з характеристикою міцності $\sigma_{\text{тим}} = 1900\text{--}2410$ МПа. Цей процес є новим різновидом термомеханічного зміцнення дроту. Сутність бейнітування полягає в нагріванні заготовки до температури аустенізації, охолодженні з подальшою ізотермічною витримкою від 5 до 60 хв в надмартенситному інтервалі температур 280–380 °С з метою отримання структури нижнього бейніту.

Крім того, за найбільш поширеним у сталевому виробництві шляхом патентування виготовлені зразки дроту з тимчасовим опором на розрив $\sigma_{\text{тим}} = 1330\text{--}2410$ МПа. Цей процес полягає в нагріванні заготовки вище температури A_{c3} та послідовному охолодженні у розплаві свинцю чи солі за температури 450–550 °С. У результаті такої термічної обробки в заготовці формується тросто-сорбітна структура, яка володіє великим запасом пластичності та може зазнавати дуже високих підсумкових деформацій без застосування проміжних теплових обробок.

Дослідженням дроту на розтяг притаманні свої особливості, зокрема відсутність надійного кріплення зразка, що досліджується, в

затискачах розривної машини через неможливість виготовлення кріпильних головок тієї чи іншої форми. Наявність цього недоліку призводить до витягування зразків дроту із затискача та викривлення результатів досліджень. Треба відзначити, що запропоновано ряд конструкцій затискачів для випробування дроту різного тимчасового опору, але вони не усувають зазначеного недоліку [3]. З метою забезпечення надійного зв'язку системи «затискач – зразок канатного дроту» розроблено нову конструкцію пристрою для кріплення у процесі проведення випробувань при одноосьовому розтягу (рис.1).

Зразок дроту 1, що випробовується, закріплюється у стакані 2 шляхом заливки його бабітом. При цьому конструктивні розміри стакану обрані з міркувань, щоб температура розплавленого бабіту не справляла впливу на властивості дроту, який випробовують, та забезпечувалося його надійне кріплення в затискачах розривної машини. За допомогою розрізного кільця 3 та гайки 4 стакан з одним кінцем залитого зразка закріплюється до перехідника 5, який, у свою чергу, поєднаний із хвостовиком 6 і знаходиться в пазах затискача випробувальної машини. Перевагою запропонованого технічного рішення є можливість дослідження необмеженої кількості зразків.

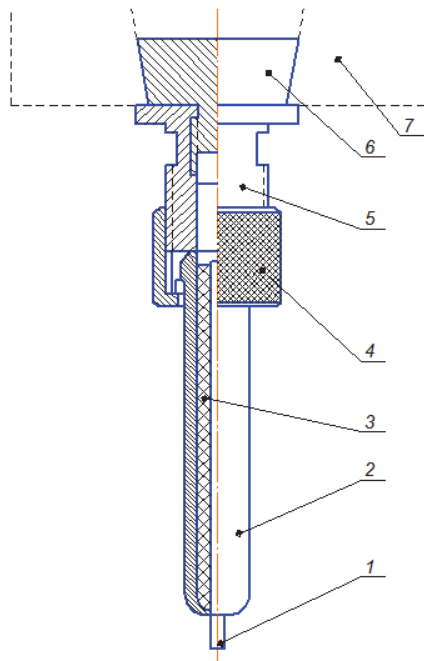


Рис. 1. Конструкція пристрою для кріплення зразків дроту при випробуванні на розтяг

У результаті обробки експериментальних даних отримано емпіричні залежності визначення границі текучості дроту різних марок сталей та технологічних схем виготовлення: шляхом патентування

$$\begin{aligned}\sigma_s &= -239,0 + 1,01\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марка 60}); \\ \sigma_s &= -1,8 + 0,909\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марка 70}); \\ \sigma_s &= -173,8 + 0,9795\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марок 60 і 70});\end{aligned} \quad (1)$$

шляхом бейнітування

$$\begin{aligned}\sigma_s &= 313,87 + 0,8171\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марка 60}); \\ \sigma_s &= -619,5 + 1,183\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марка 80}); \\ \sigma_s &= -93,84 + 0,9798\sigma_{\text{тим}} \quad (\text{марок 60 і 80}).\end{aligned} \quad (2)$$

Проведені дослідження пружно-пластичних властивостей канатного дроту в діапазоні змінення границі міцності 1330–2850 МПа дозволили розглянути функціональну залежність $E = f(\sigma_{\text{тим}})$. Для встановлення теоретичної функції, яка є ближчою до експериментальної, було виконано кількісне погодження за допомогою критерію χ -квадрат. Застосовуючи методи статистичної обробки даних та промасштабувавши у бік зменшення (1000 разів) експериментальні значення тимчасового опору розриву, отримано аналітичну залежність виду

$$E = \exp[-0,1527\sigma_{\text{тим}}^2 + 0,7767\sigma_{\text{тим}} - 0,2838] \times 10^5. \quad (3)$$

Наведена залежність дає можливість узгодити експериментальні та розрахункові значення модуля пружності дроту, при цьому середня похибка склала 3,2 %. Крім того, тісний зв'язок, що розглядається, підтверджує кореляційне відношення, яке дорівнює 0,82321. Виконаний аналіз отриманих результатів свідчить, що за мінімальної характеристики міцності ($\sigma_{\text{тим}} = 1330$ МПа) модуль пружності дорівнює $E = 163000$ МПа з подальшим його зростанням ($E = 200000$ МПа) при $\sigma_{\text{тим}} = 2200$ – 2300 МПа, а потім асимптотично наближається до величини $E = 210000$ МПа з подальшим зростанням тимчасового опору розриву.

Відомо, що отримати канатний дріт із певним рівнем міцності можна шляхом застосування різних технологічних схем виготов-

лення, а саме варіюванням величин загальних і часткових обтиснень, температурних режимів, а також хімічного складу сталі. Однак приведена вище залежність (3) не ураховує впливу того чи іншого технологічного параметра виготовлення вихідного матеріалу звитого виробу. У зв'язку з цим було розв'язано задачу знаходження рівняння, що дозволяє встановити залежність модуля пружності від ряду технологічних факторів

$$E = f(C, Mn, S, Q, q, T_{\text{ауст}}, t_{\text{ізот}}, \tau_{\text{ізот}}, \delta), \quad (4)$$

де C, Mn, S – вміст вуглецю, марганцю та сірки у сталі відповідно, %; Q і q – величини загальних і часткових обтиснень відповідно, %; $T_{\text{ауст}}$ – температура аустенізації, град; $t_{\text{ізот}}$ – температура ізотермічного розпаду, град; $\tau_{\text{ізот}}$ – тривалість ізотермічного розпаду, хв; δ – типорозмір зразка дроту, що досліджується, мм.

Таблиця 1 Однофакторний дисперсійний аналіз функціональної залежності

$$E = f(C, Mn, S, Q, q, T_{\text{ауст}}, t_{\text{ізот}}, \tau_{\text{ізот}}, \delta)$$

Параметр	Форма зв'язку	Коефіцієнти			Кореляційне відношення θ
		a_0	a_1	a_2	
C	$y = \sqrt[3]{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	-22,9973	84,139	-56,8946	0,50499
Mn	$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{-1}$	1,4186	-3,2711	2,9163	0,55045
S	$y = \sqrt[3]{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	10,0503	454,56	12505,58	0,29623
Q	$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{-1}$	0,3885	0,0477	-0,0039	0,41613
q	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	9,1022	-1,7052	0,279	0,38300
$T_{\text{ауст}}$	$y = e^{a_0} x^{a_1}$	1,6957	-0,4666	-	0,21425
$t_{\text{ізот}}$	$y = \sqrt[3]{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	20,6674	-6,2054	0,6880	0,39953
$\tau_{\text{ізот}}$	$y = e^{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	0,6387	0,0329	-0,0059	0,35904
δ	$y = \sqrt[3]{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	4,7868	6,3916	-3,2792	0,5286

При вирішенні поставленої задачі деякі параметри масштабували, зокрема величину загальних обтиснень було зменшено в 10 разів, а величину часткових обтиснень, температури аустенізації та ізотермічного розпаду – у 100 разів. Вибір найкращої форми зв'язку за кожним фактором здійснювався на основі однофакторного дисперсійного аналізу, при цьому критерієм вибору служила величина залишкової дисперсії.

Знайдене кореляційне відношення дозволяє визначати головний фактор, який справляє найбільший вплив на пружну характеристику канатного виробу. Однофакторний дисперсійний аналіз (табл. 1) показав, що вміст марганцю у сталі є основним фактором.

Беручи за основу рівняння, що відображає залежність $E = f(Mn)$, і застосовуючи

метод Брандона [4], знайдено складові узагальненого рівняння для усіх інших технологічних факторів (табл. 2).

На підставі отриманої залежності розглянуто вплив кожного з відзначених технологічних факторів на пружні властивості дроту звитого виробу. З цією метою було визначено чисельні значення складової модуля пружності для кожного фактора через певний інтервал, який становив для вмісту вуглецю та марганцю 0,02 %, вмісту сірки – 0,001 %, величини загальних і часткових обтиснень – відповідно 4,0 і 1,68 %, температури аустенізації та ізотермічного розпаду відповідно 9,0 і 5,0 °С, тривалості ізотермічного розпаду – 0,49 хв, типорозміру дроту – 0,10 мм. При розгляді характеру впливу одного фактора усі інші фіксувалися за середніми значеннями їх діапазонів змінення.

Таблиця 2 Узагальнене множинне рівняння модуля пружності канатного дроту залежно від ряду факторів технологічного характеру

Параметр	Вид залежності	Коефіцієнти			Кореляційне відношення θ	Помилка апроксимації, %
		a_0	a_1	a_2		
C	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	-0,19050	0,33489	-0,06551	0,86876	3,475
Mn	$y = \frac{1}{a_0 + a_1x + a_2x^2}$	1,41859	-3,27111	2,91652		
S	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	2,35173	-192,455	3840,79		
Q	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,39123	-0,16462	0,01435		
q	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,01064	0,00553	-0,00584		
$T_{ауст}$	$y = y_{max} \sin(a_0 + a_1x) $	-0,01312	0,14301	-		
$t_{ізот}$	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,58133	-0,30252	0,03763		
$\tau_{ізот}$	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,01231	-0,01691	0,00048		
δ	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	0,66851	0,63395	-0,27686		

Потім було знайдено їх суму зі значеннями фактора, що розглядається. Отримані графічні залежності дозволили якісно оцінити вплив ряду факторів технологічного характеру на пружні властивості матеріалу (рис. 2–4).

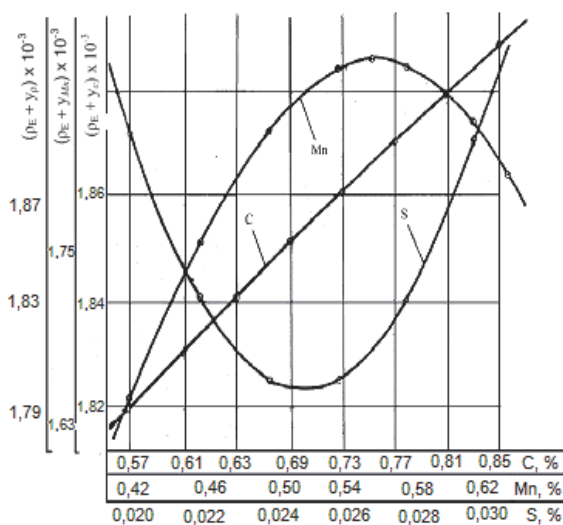


Рис. 2. Вплив елементів хімічного складу сталі на пружні властивості дроту

Встановлено, що зростання вмісту вуглецю у сталі, температури аустенізації та, меншою мірою, величини часткових обтиснень сприяє підвищенню пружних властивостей канатного дроту.

Величина модуля пружності дроту зростає з підвищенням вмісту марганцю до 0,56 %, а надалі впливає негативно. Вплив вмісту сір-

ки у сталі, величини загальних обтиснень, режиму ізотермічного розпаду на пружну характеристику матеріалу є адекватним: спочатку зростання зазначених параметрів сприяє зниженню, а потім зростанню значення модуля пружності.

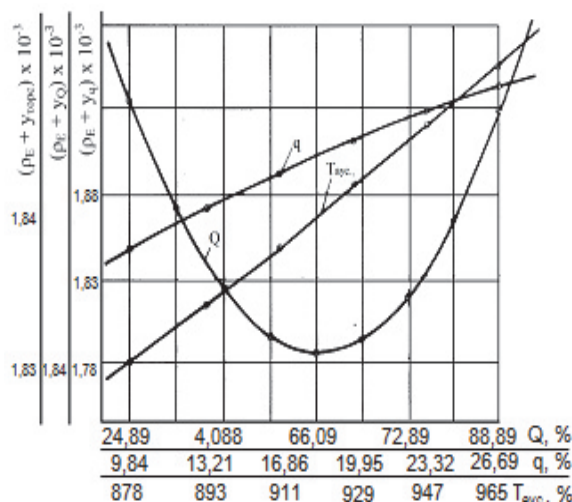


Рис. 3. Вплив технологічних параметрів виготовлення на модуль пружності

Зростання спостерігається за вмісту сірки у сталі вище 0,025 % і в канатному дроті, виготовленому із загальними обтисненнями, вище 56,89 %. Процес ізотермічного розпаду, зокрема температура та тривалість, справляє суттєвий вплив, при цьому дріт має найбільш високі значення складової модуля пружності в температурному інтервалі 530–560 °С. Від-

носно тривалості ізотермічного розпаду слід відзначити, що максимальні значення спостерігаємо при $\tau = 0,25 - 1,0$ хв і $\tau = 31,0 - 35,0$ хв. Зі зростанням діаметра дроту до 1,10 мм пружна характеристика майже не зростає, а подальше підвищення типорозміру діє негативно.

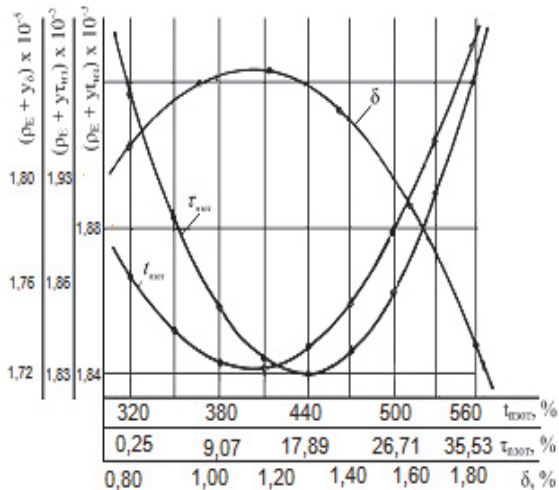


Рис. 4. Вплив режиму ізотермічного розпаду та типорозміру на пружну характеристику елемента звитого виробу

В цілому виконані дослідження при одноосьовому розтягу дозволили отримати залежності зміння границі текучості та модуля пружності канатного дроту різних технологічних схем виготовлення в широкому діапазоні зміння характеристики міцності, реалізація яких спрямована на удосконалення наукових основ у галузі технології виготовлення сталевих канатів для транспортних засобів різного призначення.

Висновки

Розглянуто наступні технологічні схеми (патентування, бейнітування та «загартування + електричний відпуск»), за якими виготовлено канатний дріт різного діаметра та границі міцності. Відмітною особливістю зазначених вище технологічних процесів є температурний режим ізотермічного розпаду, що забезпечує отримання необхідної структури ви-

хідного матеріалу для його холодної деформації.

Запропоновано залежності, що відображають вплив характеристики міцності в діапазоні зміння 1330–2850 МПа на границю текучості та модуль пружності вихідного матеріалу звитого виробу.

Встановлено функціональну залежність, що ураховує вплив хімічного складу сталі та ряду технологічних параметрів на пружну характеристику канатного дроту і дозволяє надати якісну оцінку кожного з розглянутих факторів.

Отримані залежності на основі досліджень при одноосьовому розтягу сприяють підвищенню якісних показників і вирішенню важливої проблеми виготовлення сталевих канатів із заданими пружними властивостями.

Література

1. Малинин А.А. Прикладная теория пластичности и ползучести / А.А. Малинин. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
2. Житков Д.Г. Стальные канаты для подъемно-транспортных машин / Д.Г. Житков, И.Т. Поспехов. – М.: Металлургиздат, 1978. – 392 с.
3. Горб М.Л. Приспособления и устройства для исследования механических свойств материалов / М.Л. Горб, А.А. Островский. – К.: Наукова думка, 1993. – 70 с.
4. Егоршин А.А. Корреляционно-регрессивный анализ / А.А. Егоршин, Л.М. Малярц. – Х.: Основа, 2008. – 208 с.

Рецензент: О.С. Полянський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 20 червня 2014 р.