

УДК 66.023:006.354

АНДРЕЄВ І. А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРАХУНОК МОДУЛЮ ПРУЖНОСТІ СТАЛЕЙ ПІД ЧАС РОЗТЯГУ

Раціональне використання ресурсів при проектуванні посудин та апаратів та забезпечення зростаючих потреб у них потребує виконання розрахунків на міцність і стійкість, які потребують застосування відповідних значень модулю пружності під час розтягу E . Метою статті є удосконалення визначення модулю пружності сталей під час розтягу, величина якого нормується чинними в Україні нормативними документами. На основі стандартних таблиць побудовано і проаналізовано точкові графіки зміни модулю пружності вуглецевих, низьколегованих, теплопривних, корозійностійких хромистих, жароміцних і жаростійких аустенітні сталей і сплавів на залізнікелевій основі під час розтягу E залежно від температури t . Запропоновано апроксимувати ці залежності нескладними математичними рівняннями. Отримані формули дозволяють при виконанні розрахунків відмовитись від використання стандартних таблиць, додаткової інтерполяції проміжних значень модулів пружності сталей під час розтягу E , що в свої чергу спрощує як сам розрахунок, так і розробку відповідних комп'ютерних програм. Середнє значення похибок виконаних апроксимацій при цьому знаходиться в діапазоні від 0 % до 0,218 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з фактичними величинами.

Ключові слова: модуль пружності, сталь, рівняння регресії, ресурсозбереження

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2024.300978

Corresponding author: Andreiev@ukr.net

Received 29 January 2024; Accepted 15 February 2024

Постановка проблеми. Ресурсозбереження на стадії проектування посудин і апаратів ґрунтується на забезпеченні раціонального використання ресурсів, що передбачає виконання відповідних розрахунків на міцність і стійкість. Найбільш поширеними конструкційними матеріалами, які застосовуються при виготовленні посудин і апаратів є сталі, які у свою чергу відрізняються за хімічним складом. Одним з основних механічних властивостей сталей є модуль пружності під час розтягу E , який був використаний при розробці алгоритмів розрахунків елементів посудин та апаратів на стійкість [1], товщин труб з урахуванням температурних напружень [2], кожухотрубних теплообмінників [3], опорних вузлів посудин та апаратів [4] і т. ін. Величини E у нормативних документах і розроблених алгоритмах подаються залежно від марки сталі і температури t з кроком 50 °С. При цьому проміжні значення модулів пружності під час розтягу E визначаються інтерполяцією, що потребує звертання до таблиць і ускладнює розробку комп'ютерних програм розрахунку.

Тому виникає потреба у спрощенні методики визначення модулів пружності під час розтягу E , а конкретно – у використанні простих формул для розрахунку величин E без використання довідкових таблиць, що і реалізується у статті.

Аналіз попередніх досліджень. В опублікованих наукових працях була знайдена формула, що стосується розрахунку модуля пружності дорожнього одягу при призначенні шарів посилення [5], а в статті [6] – шлях заміни табличних значень величин рівняннями регресії.

Невирішеною частиною наукової проблеми є апроксимування залежності нормативного значення модуля пружності сталей під час розтягу E від температури t простими рівняннями, які б були зручними як для інженерних розрахунків, так і для розробки комп'ютерних програм.

Метою статті є опис залежностей модуля пружності сталей під час розтягу від температури t простими математичними рівняннями з середньою похибкою апроксимації не більше 0,25 %.

Виклад основного матеріалу. Значення нормативних значень модуля пружності сталей під час розтягу E наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Модулі поздовжньої пружності E

Матеріал	Модуль поздовжньої пружності $E \cdot 10^{-5}$, МПа, при температурі, °С													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Вуглецеві і низьколеговані сталі	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	–	–	–	–	–
Теплотривкі і корозійно-стійкі хромисті сталі	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	–	–
Жароміцні і жаростійкі аустенітні сталі і сплави на залізнікелевій основі	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32

Запропоновано апроксимувати залежності модулів пружності під час розтягу E від температури t нескладними рівняннями, для чого були побудовані і проаналізовані точкові графіки $E = f(t)$ за даними табл. 1.

Точковий графік $E = f(t)$, побудований для вуглецевих і низьколегованих сталей за табл. 1, наведено на рис. 1.

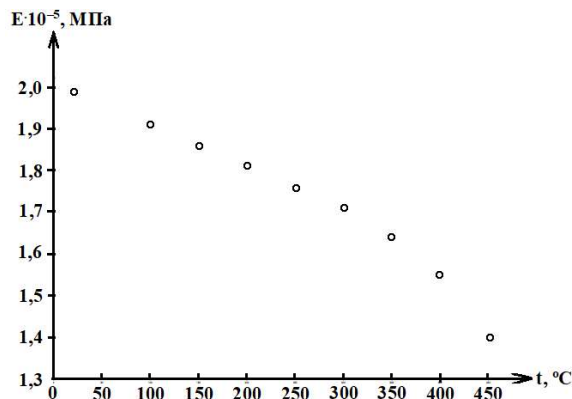


Рис. 1 – Точковий графік залежності $E = f(t)$ для вуглецевих і низьколегованих сталей

Для більш точного опису залежності $E = f(t)$ математичним рівнянням розглянемо окремо 2 ділянки: 1 – в діапазоні змінювання t від 20 °С до 300 °С (рис. 2) і 2 – в діапазоні змінювання t від 300 °С до 450 °С (рис. 3).

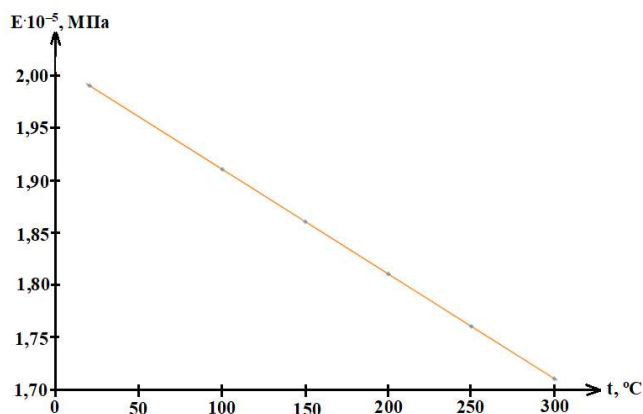


Рис. 2 – Залежність $E = f(t)$ для вуглецевих і низьколегованих сталей в діапазоні змінювання t від 20 °С до 300 °С

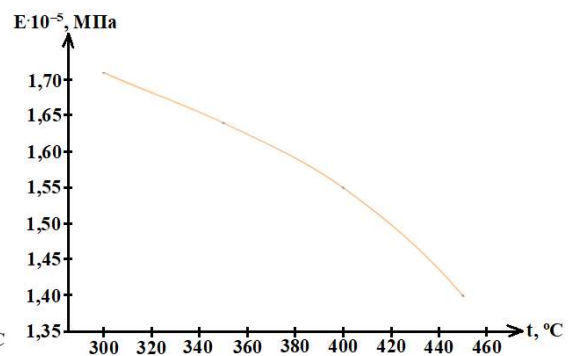


Рис. 3 – Залежність $E = f(t)$ для вуглецевих і низьколегованих сталей в діапазоні змінювання t від 300 °С до 450 °С

В діапазоні змінювання температури t від 20 °С до 300 °С включно залежність модулю пружності під час розтягу $E = f(t)$ для вуглецевих і низьколегованих сталей описується простим лінійним рівнянням $E = -100t + 2,01 \cdot 10^5$. При змінюванні t від 300 °С до 450 °С включно запропоновано застосувати кубічну регресію $E = -5,33 \cdot 10^{-3}t^3 + 5,2t^2 - 1,827 \cdot 10^3t + 3,95 \cdot 10^5$ (середня похибка апроксимації дорівнює 0,0006 %). В наведених і подальших запропонованих формулах температура t підставляється в °С, а результат отримується в МПа.

Аналогічно проаналізуємо залежності $E = f(t)$ для теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей, а також для жароміцних і жаростійких аустенітних сталей і сплавів на залізнікелевій основі.

З таблиці 1 виходить, що теплопровні і корозійно-стійкі хромисті сталі в діапазоні змінювання температури t від 20 °С до 100 °С включно характеризуються однаковим модулем пружності під час розтягу $E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа. При більших температурах залежність $E = f(t)$ подано у вигляді точкового графіку $E = f(t)$ (рис. 4).

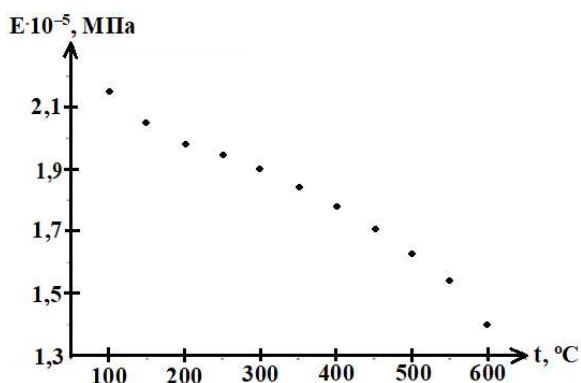


Рис. 4 – Точковий графік залежності $E = f(t)$ для теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей

Проведений аналіз точкового графіку (рис. 4) дозволив запропонувати для опису змінювання модулю пружності під час розтягу E теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей такі ділянки: першу – в діапазоні змінювання температури t від 100 °С до 250 °С включно (рис. 5), другу – в діапазоні змінювання t від 250 °С до 600 °С включно (рис. 6).

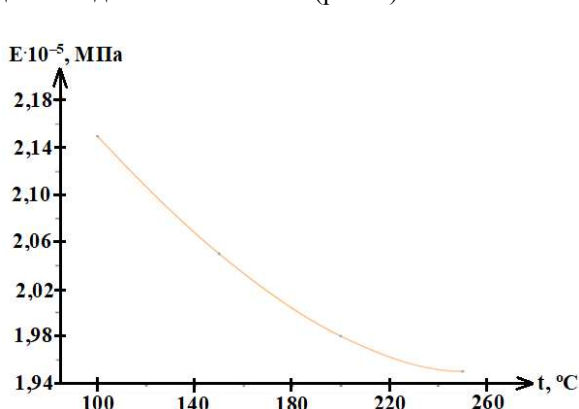


Рис. 5 – Залежність $E = f(t)$ для теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей в діапазоні змінювання t від 100 °С до 250 °С

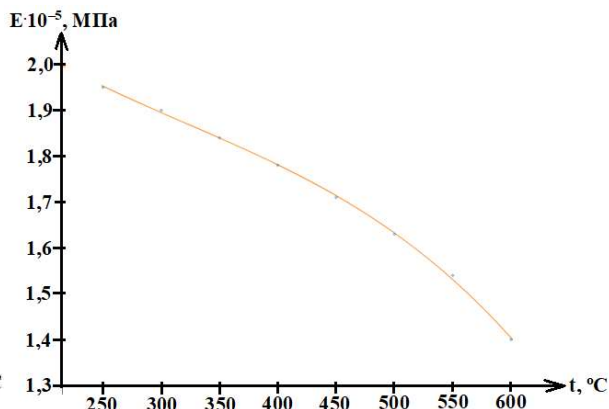


Рис. 6 – Залежність $E = f(t)$ для теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей в діапазоні змінювання t від 250 °С до 600 °С

Запропоновано залежність $E = f(t)$ для теплопровних і корозійно-стійких хромистих сталей в діапазоні змінювання t від 100 °С до 250 °С описати кубічною регресією $E = 1,33 \cdot 10^{-3}t^3 - 2,63 \cdot 10^2t + 2,4 \cdot 10^5$ (середня похибка апроксимації дорівнює $5,8 \cdot 10^{-8}$ %), а при змінюванні t від 250 °С до 600 °С – кубічною регресією $E = -7,5 \cdot 10^{-4}t^3 + 0,722t^2 - 3,426 \cdot 10^2t + 2,4748 \cdot 10^5$ (середня похибка апроксимації дорівнює 0,218 %).

Відповідно до таблиці 1 значення модулю пружності під час розтягу для жароміцних і жаростійких аустенітних сталей і сплавів на залізнікелевій основі $E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа в діапазоні температур t від 20 °С до 100 °С. При більших температурах залежність $E = f(t)$ подано у вигляді точкового графіку (рис. 7).

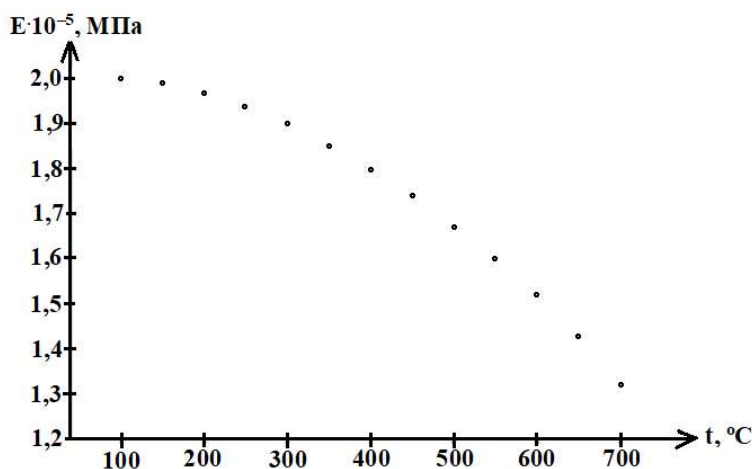


Рис. 7 – Точковий графік залежності $E = f(t)$ для жароміцних і жаростійких аустенітних сталей і сплавів на залізнікелевій основі в діапазоні змінювання t від 100 °С до 700 °С

Залежність $E = f(t)$ для жароміцних і жаростійких аустенітних сталей і сплавів на залізнікелевій основі в діапазоні змінювання t від 100 °С до 700 °С описується квадратичною регресією $E = -0,152t^2 + 9,101t + 2,009 \cdot 10^5$ (рис. 8). Середня похибка апроксимації при цьому дорівнює 0,195 %.

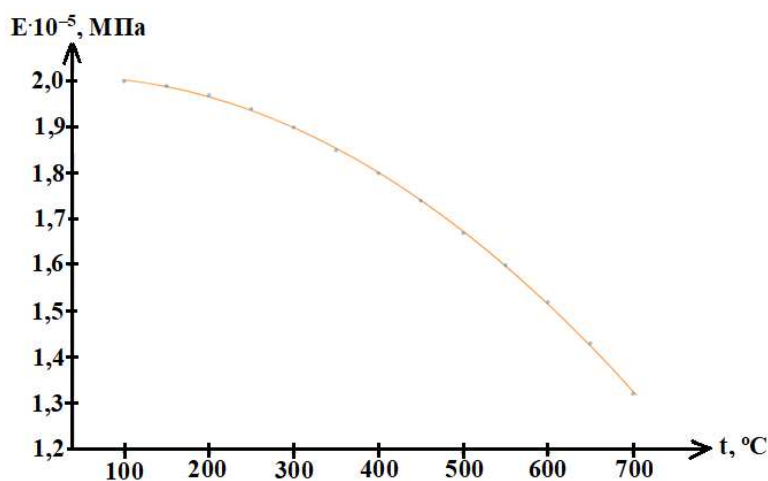


Рис. 8 – Залежність $E = f(t)$ для жароміцних і жаростійких аустенітних сталей і сплавів на залізнікелевій основі в діапазоні змінювання t від 100 °С до 700 °С

Висновки. Отримані формули для розрахунку модулю пружності сталей під час розтягу. Максимальне значення похибки апроксимації при цьому дорівнює 0,218 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з нормативними величинами. Використання наведеного удосконалення сприяє спрощенню розрахунку елементів посудин та апаратів на міцність і стійкість.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується продовжити роботу з удосконалення розрахунків на міцність і стійкість елементів посудин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв.

Список використаної літератури

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок основних елементів посудин та апаратів: підруч. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 428 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65136>.
2. Андреев Ігор. Розрахунок технологічних трубопроводів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52475>.
3. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок кожухотрубних теплообмінників: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 140 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50426>.
4. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок опорних вузлів посудин і апаратів хімічних виробництв: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 94 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45669>.
5. Міщенко М. Л. Обґрунтування методики визначення модуля пружності існуючого дорожнього одягу при призначенні шарів посилення. Дороги і мости. Київ, 2008. Вип. 8. С. 184–191.
6. Андреев І. А. Удосконалення розрахунку трубної решітки кожухотрубного теплообмінного апарата на міцність. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. 2023. № 2 (22). С. 9–14.

Igor Andreiev

CALCULATION OF THE ELASTIC MODULUS OF STEEL DURING TENSILE

The rational use of resources in the design of vessels and devices and ensuring their growing needs requires the performance of strength and stability calculations, which require the use of appropriate values of the modulus of elasticity during tension E . The purpose of the article is to improve the definition of the modulus of elasticity of steels during tension, the value of which is normalized by the current in Ukraine by regulatory documents. On the basis of standard tables, dot graphs of changes in modulus of elasticity of carbon, low-alloy, heat-resistant, corrosion-resistant chromium, heat-resistant and heat-resistant austenitic steels and iron-nickel-based alloys during tension E depending on temperature t were constructed and analyzed. It is proposed to approximate these dependencies with simple mathematical equations.

As a result, it was determined that the dependence $E = f(t)$ for carbon and low-alloy steels in the range of changing t from 20 °C to 300 °C is described by a simple linear equation $E = -100t + 2.01 \cdot 10^5$. When changing t from 300 °C to 450 °C inclusive, it is proposed to apply cubic regression $E = -5.33 \cdot 10^{-3}t^3 + 5.2t^2 - 1.827 \cdot 10^3t + 3.95 \cdot 10^5$. In the above and further proposed formulas, the temperature t is substituted in °C, and the result is obtained in MPa.

Heat-resistant and corrosion-resistant chromium steels in the temperature range t from 20 °C to 100 °C inclusive are characterized by the same modulus of elasticity during tension $E = 2.15 \cdot 10^5$ MPa. The dependence of $E = f(t)$ in the range of changing t from 100 °C to 250 °C inclusive can be described by the cubic regression $E = 1.33 \cdot 10^{-3}t^3 - 2.63 \cdot 10^2t + 2.4 \cdot 10^5$, and when changing t from 250 °C to 600 °C inclusive – by cubic regression $E = -7.5 \cdot 10^{-4}t^3 + 0.722t^2 - 3.426 \cdot 10^2t + 2.4748 \cdot 10^5$.

The value of the modulus of elasticity during tension for heat-resistant and heat-resistant austenitic steels and iron-nickel-based alloys $E = 2.15 \cdot 10^5$ MPa in the temperature range t from 20 °C to 100 °C. The dependence of $E = f(t)$ in the range of changing t from 100 °C to 700 °C inclusive is described by the quadratic regression $E = -0.152t^2 + 9.101t + 2.009 \cdot 10^5$.

The obtained formulas make it possible to abandon the use of standard tables and additional interpolation of intermediate values of the modulus of elasticity of steels during tension when performing calculations, which in turn simplifies both the calculation itself and the development of appropriate computer programs.

The average error value of the performed approximations is in the range from 0 % to 0.218 %, which indicates a high level of coincidence of the regression equations with the actual values.

The use of the proposed formulas for calculating the modulus of elasticity of steels during tension makes it possible to simplify the calculation of vessels and devices for strength and stability.

Keywords: resource saving, steel, modulus of elasticity, regression equation.

References

1. Andreiev I. A. (2024). Konstruiuvannja i rozrakhunok osnovnyh elementiv posudyn ta aparativ: pidruch. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikors'kogo. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65136> [In Ukrainian].
2. Andreiev Ihor (2023). Rozrakhunok tekhnolohichnykh truboprovodiv: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikors'koho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52475> [In Ukrainian].
3. Andreiev I. A. (2022). Konstruiuvannja i rozrakhunok kozhukhotrubnykh teploobminnykh: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikors'koho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50426> [In Ukrainian].
4. Andreiev I. A. (2021). Konstruiuvannja i rozrakhunok opornykh vuzliv posudyn i aparativ khimichnykh vyrobnytstv: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikors'koho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45669> [In Ukrainian].
5. Mischenko M. L. (2008). Obgruntuvannja metodyky vyznachennja modulja pruzhnosti isnujuchoho dorozhn'oho odiahu pry pryznachenni shariv posylenja. Dorohy i mosty, vyp. 8, pp. 184–191 [In Ukrainian].
6. Andreiev I. A. (2023). Udoskonalennja rozrakhunku trubnoi reshitky kozhukhotrubnoho teploobminnoho aparata na mitsnist'. Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikors'koho», seriia „Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhezhennja”, № 2 (22), pp. 9–14 [In Ukrainian].