

ГЕОРГІЙ ФІЛАТОВ

**ОПІР МАТЕРІАЛІВ
В ЗАДАЧАХ І ПРИКЛАДАХ**

КНИГА 1

**Розрахунок статично визначуваних
стержневих систем**

Навчальний посібник

Київ
Видавництво Ліра-К
2019

УДК 620.17.08(075.8+076)
Ф51

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки
як навчальний посібник
(лист №1/11-593 від 18.01.12)*

Рецензенти:

Красовський В.Л., д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва і архітектури.

Блохін Е.П., д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельної механіки Дніпропетровського національного університету ім. академіка В. Лазаряна

Філатов Г. В.

Ф51 Опір матеріалів в задачах і прикладах : Розрахунок статично визначуваних стержневих систем Кн. 1 : Навч. посіб. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2019. – 360 с.

ISBN 978-617-7748-35-8

У книзі викладені теоретичні основи опору матеріалів та надано практичні рекомендації, що дозволяють самостійно придбати навички розв'язку типових задач опору матеріалів з міцності, жорсткості і стійкості інженерних споруд і деталей машин. В книзі наводяться варіанти завдань для самостійної роботи та допомога у вигляді підказок, які допомагають поступово засвоювати знання в покроковому режимі, переходячи від рівня до рівня. Книга призначена для студентів очної та заочної форм навчання, які вивчають опір матеріалів, і осіб, які бажають самостійно вивчити цю дисципліну.

УДК 620.17.08(075.8+076)

ISBN 978-617-7748-35-8

© Філатов Г., 2019
© Видавництво Ліра-К, 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
РОЗДІЛ 1. ЗАДАЧІ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ	
1.1. Вступ.....	9
1.2. Історична довідка про розвиток науки “Опір матеріалів”	10
1.3. Три задачі опору матеріалів	14
1.4. Уявлення про розрахункову схему. Три групи схематизації.....	14
1.5. Метод перерізів. Внутрішні силові фактори	16
1.6. Уявлення про напруження у точці. Інтегральні залежності між внутрішніми силовими факторами і напруженнями у точці	19
РОЗДІЛ 2. ОСЬОВЕ РОЗТЯГАННЯ ТА СТИСКАННЯ	
2.1. Задача №1. Розрахунок статично визначуваних стержнів без урахування власної ваги. Основні теоретичні відомості	21
2.1.1. Варіанти завдань.....	24
2.1.2. Допомога	25
2.1.3. Відповіді на запитання до задачі №1	31
2.2. Задача №2. Розрахунок статично визначуваних стержнів з урахування власної ваги. Основні теоретичні відомості	32
2.2.1. Варіанти завдань.....	36
2.2.2. Допомога	38
2.2.3. Відповіді на запитання до задачі №2	45
2.3. Задача №3. Розрахунок статично визначуваних стержневих систем.....	46
2.3.1. Варіанти завдань.....	46
2.3.2. Допомога	48
2.3.3. Відповіді на запитання до задачі №3	51
2.4. Задача №4. Розрахунок систем зчленованих тіл	51
2.4.1. Варіанти завдань.....	51
2.4.2. Допомога	52
2.4.3. Відповіді на запитання до задачі №4	53
2.5. Задача №5. Розрахунок статично невизначуваних стержневих систем.....	54
2.5.1. Варіанти завдань.....	54
2.5.2. Допомога	55
2.5.3. Відповіді на запитання до задачі №5	59
2.6. Задача №6. Урахування температурних та монтажних напружень.....	59
2.6.1. Вплив неточностей виготовлення елементів на величину зусиль в статично невизначуваних конструкціях.....	59
2.6.2. Вплив температурних напружень на міцність стержневих систем.....	61
2.6.3. Варіанти завдань.....	63
2.6.4. Допомога	65
2.6.5. Відповіді на запитання до задачі №6	70

РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАПРУЖЕНОГО І ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ. ТЕОРІЇ МІЦНОСТІ

3.1. Загальні теоретичні відомості про напружений стан у точці. Головні площадки і головні напруження. Типи напруженого стану у точці	71
3.2. Лінійний напружений стан.....	73
3.3. Плоский напружений стан	75
3.3.1. Визначення головних напружень і положення головних площадок	78
3.3.2. Екстремальні дотичні напруження.....	80
3.4. Деформований стан у точці. Узагальнений закон Гука.....	82
3.5. Потенціальна енергія деформацій при об'ємному напруженому стані. Питома потенціальна енергія зміни форми	83
3.6. Оцінка міцності за відомим напруженим станом. Класичні теорії міцності.....	85
3.6.1. Теорія найбільших нормальних напружень	86
3.6.2. Теорія найбільших лінійних деформацій	87
3.6.3. Теорія найбільших дотичних напружень	88
3.6.4. Енергетична теорія міцності	89
3.6.5. Теорія міцності Мора.....	91
3.7. Задача №1. Визначення напружень в довільних площадках	95
3.7.1. Варіанти завдань	95
3.7.2. Допомога	96
3.7.3. Відповіді на запитання до задачі №1	100
3.8. Задача №2. Визначення головних напружень у точці	101
3.8.1. Варіанти завдань	101
3.8.2. Допомога	102
3.8.3. Відповіді на питання до задачі №2.....	106

РОЗДІЛ 4. ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ ФІГУР

4.1. Статичний момент площі. Визначення положення центра ваги плоских фігур	107
4.2. Осьові, полярний і відцентровий моменти інерції	108
4.3. Моменти інерції простих фігур	110
4.4. Залежності для моментів інерції відносно паралельних осей	113
4.5. Залежності для моментів інерції при повороті осей. Головні осі і головні моменти інерції.....	115
4.6. Задача №1. Визначення моментів інерції при паралельному перенесенні осей	117
4.6.1. Варіанти завдань	117
4.6.2. Допомога	118
4.6.3. Відповіді на запитання до задачі №1	122
4.7. Задача №2. Визначення моментів інерції при повороті осей.....	123
4.7.1. Варіанти завдань	123
4.7.2. Допомога	125
4.7.3. Відповіді на запитання до задачі №2	133

РОЗДІЛ 5. ЗСУВ І КРУЧЕННЯ

5.1. Уявлення про деформацію зсуву	134
5.2. Чистий зсув	135
5.3. Аналіз напруженого стану при чистому зсуві	136
5.4. Закон Гука при чистому зсуві. Залежність між модулями пружності першого і другого роду	137
5.5. Перевірка міцності при чистому зсуві. Уявлення про допустиме напруження при зсуві	139
5.6. Розрахунок болтових і заклепкових з'єднань	140
5.7. Розрахунок зварних з'єднань	142
5.8. Задача №1. Розрахунок заклепкових і зварних з'єднань	144
5.8.1. Варіанти завдань	144
5.8.2. Допомога	147
5.8.3. Відповіді на запитання до задачі №1	154
5.9. Кручення валів. Уявлення про крутний момент	155
5.10. Визначення дотичних напружень і деформацій при крученні валів ...	156
5.11. Розрахунок валів на міцність і жорсткість при крученні	158
5.12. Задача №2. Розрахунок валів на кручення	159
5.12.1. Варіанти завдань	159
5.12.2. Допомога	162
5.12.3. Відповіді на запитання до задачі №2	172

РОЗДІЛ 6. ВНУТРІШНІ СИЛОВІ ФАКТОРИ ЗГИНАННЯ

6.1. Плоске поперечне згинання. Поперечна сила і згинальний момент	173
6.2. Диференціальні залежності при згинанні	175
6.3. Форми контролю правильності побудови епюр поперечних сил і згинальних моментів	176
6.3.1. Наслідки про стрибки	176
6.3.2. Наслідки з диференціальних залежностей	177
6.4. Задача №1. Побудова епюр поперечних сил і згинальних моментів аналітичним методом	179
6.4.1. Варіанти завдань	179
6.4.2. Допомога	181
6.4.3. Відповіді на запитання до задачі №1	196
6.5. Задача №2. Побудова епюр поперечних сил і згинальних моментів методом “характерних” перерізів	197
6.5.1. Варіанти завдань	197
6.5.2. Допомога	198
6.5.3. Відповіді на запитання до задачі №2	212
6.6. Задача №3. Визначення внутрішніх силових факторів в рамках методом “характерних” перерізів	213
6.6.1. Варіанти завдань	213
6.6.2. Допомога	215
6.6.3. Відповіді на запитання до задачі №3	230

РОЗДІЛ 7. ПЛОСКЕ ПОПЕРЕЧНЕ ЗГИНАННЯ. РОЗРАХУНОК БАЛОК НА МІЦНІСТЬ

7.1. Визначення нормальних напружень при згинанні. Умова міцності	232
7.2. Визначення дотичних напружень. Формула Журавського	235
7.3. Задача №1. Визначення розмірів поперечних перерізів	237
7.3.1. Варіанти завдань	237
7.3.2. Допомога	240
7.3.3. Відповіді на запитання до задачі №1	254
7.4. Задача №2. Визначення величини допустимого навантаження.....	255
7.4.1. Варіанти завдань	255
7.4.2. Допомога	257
7.4.3. Відповіді на запитання до задачі №2	260
7.5. Задача №3. Повний розрахунок балок на міцність	261
7.5.1. Варіанти завдань	261
7.5.2. Допомога	264
7.5.3. Відповіді на запитання до задачі №3	281

РОЗДІЛ 8. РОЗРАХУНОК БАЛОК НА ЖОРСТКІСТЬ

8.1. Уявлення про пружну лінію. Прогин і кут повороту. Диференціальне рівняння пружної лінії	282
8.2. Визначення переміщення при згинанні балок методом початкових параметрів	284
8.3. Задача №1. Розрахунок балок на жорсткість методом початкових параметрів	286
8.3.1. Варіанти завдань	286
8.3.2. Допомога	288
8.3.3. Відповіді на запитання до задачі №1	300
8.4. Задача №2. Розрахунок стержневих систем методом Мора-Сімпсона. Основні теоретичні відомості	300
8.4.1. Варіанти завдань	302
8.4.2. Допомога	305
8.4.3. Відповіді на запитання до задачі №2	317
8.5. Задача №3. Визначення переміщень при згинанні методом Верещагіна. Основні теоретичні відомості	318
8.5.1. Варіанти завдань	324
8.5.2. Допомога	326
8.5.3. Висновки по розділу	344
8.5.4. Відповіді на запитання до задачі №3	354

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	347
--------------------------------	-----

ДОДАТКИ	348
----------------------	-----

ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку суспільства вища освіта в Україні випробовує значних змін. Це торкається перш за все впровадження в систему вищої освіти реформ і перехід на рейтингову систему. Нова реформа передбачає скорочення кількості аудиторних занять і засвоєння студентами учбового матеріалу шляхом самостійної роботи. Такий підхід до навчання широко застосовується в Європі і дає непогані результати. Можна сперечатися і заперечувати, але час натаскування і наставництва минає. Проблема сучасного суспільства, зростаючий рівень знань в різних галузях науки і виробництва вимагають від вищої школи таких методів підготовки, щоб студент сам навчився приймати рішення в складних обставинах.

Враховуючи ці обставини, завданням вищої школи є створення умов для самостійної роботи студентів. В наш час стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій багато викладачів бачать вихід у створенні електронних підручників, посібників, навчальних систем і мультимедійних комплексів. Створення такої форми самонавчання особливе важливим є для студентів заочної форми навчання, територіально віддалених від університетських центрів. Цей шлях розвитку дистанційної форми навчання є безумовно правильним і за ним майбутнє. Але в Україні все ще не досить розгалужена мережа інформаційних комунікацій. Навіть у багатьох університетах для студентської молоді обмежений доступ до Інтернету і електронної пошти, відсутні класи вільного доступу, де студент міг би скористатися електронними методами навчання. Тому за таких умов ще рано повністю відмовлятися від книжкової форми навчання. Підручники і посібники мають бути написані так, щоб студент міг поступово засвоювати знання, бажано в покроковому режимі, переходячи з рівня на рівень. При створенні таких посібників важливо не перенавантажувати студента зайвою інформацією, надавати більше прикладів вирішення задач, супроводжуючи ці приклади необхідним об'ємом теоретичних положень і висновків.

Дана робота побудована саме за таким принципом. Студент спочатку знайомиться з теоретичним матеріалом відповідно до теми, що вивчається, а потім його увазі пропонується в багаторівневому режимі вирішити декілька варіантів чисельного розв'язку задач за темою, що вивчається.

Опір матеріалів є загально інженерною наукою, що вивчає методи розрахунку елементів конструкції і деталей машин на міцність, жорсткість і стійкість. Опір матеріалів вивчають студенти всіх технічних спеціальностей у вищих і середніх технічних учбових закладах. Даний посібник призначений для студентів денної і заочної форм навчання напрямку підготовки — інженерна механіка і машинобудування, освітньо-кваліфікаційний рівень — бакалавр, але може бути використаний при підготовці випускників інших напрямків підготовки.

Учбовий матеріал в посібнику розбитий на окремі теми. Кожна з тем присвячена вивченню окремих розділів опору матеріалів. Основним завданням

даного посібника є навчання студентів методам вирішення найбільш типових задач опору матеріалів. Увазі студентів пропонується декілька варіантів задач відповідно до теми, що вивчається. Студент може вибрати будь-який з цих варіантів на свій розсуд. Приступаючи до розв'язку чергової задачі, студент отримує умову задачі з необхідними для вирішення задачі чисельними даними, а також питання, на яке йому необхідно відповісти. Якщо студент не може відповісти на поставлене питання, він може звернутися до підказки, скориставшись підрозділом “Допомога”, де наводяться основні теоретичні відомості, а також підказки у вигляді прикладів розв'язку подібної задачі в багаторівневому режимі. Підказка містить не лише чисельний розв'язок задачі, але й методику цього розв'язку. В процесі розв'язку задачі студент може скористатися різними довідковими даними, наведеними в “Додатках”, які містять відомості про деякі властивості матеріалів, фізичні константи, сортамент прокатної сталі та ін.

Слід зазначити, що опір матеріалів, як і будь-яка інша наука, побудований за принципом спадкоємності знань, іншими словами, вимагає послідовного вивчення матеріалу. Не можна, наприклад, не вміючи визначати внутрішні силові фактори при згинанні, розв'язувати задачу міцності або жорсткості балки, або, не вміючи визначати переміщення, приступати до розрахунку статично невизначуваної стержневої системи. У зв'язку з цим рекомендується починати вивчення наступного розділу, якщо ви впевнені, що добре засвоїли матеріал попереднього розділу.

При підготовці цього посібника були використані деякі методичні прийоми і методи, що викладаються в курсі лекцій з опору матеріалів колишнього завідувача кафедрою теоретичної механіки і опору матеріалів УГХТУ професора В.І.Тарновського, які мають відношення до теорії розрахунку внутрішніх зусиль, визначенні переміщень методом Мора-Сімпсона і матричним методом, розрахунку статично невизначуваних стержневих систем методом сил у звичайній і матричній формі, розрахунку елементів конструкцій при складному опорі і при урахованні динамічної дії навантажень.

Автор виражає вдячність завідувачу кафедри будівельної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва і архітектури, д.т.н., професору Красовському В.Л. та завідувачу кафедри будівельної механіки Дніпропетровського національного університету ім. академіка В. Лазаряна д.т.н., професору Блохіну Е.П. за рецензування цієї книги і зроблені ними зауваження.

РОЗДІЛ 1.

ЗАДАЧІ ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Вступ

При проектуванні різних інженерних споруд доводиться визначати розміри окремих елементів конструкцій. Це завдання вирішується на основі розрахунків, метою яких є створення міцної, стійкої, довговічної і разом з тим економічної споруди. Таке ж завдання виникає при проектуванні машин, літаків, суден і т.п. Всі ці питання розглядаються в комплексі дисциплін, основою для яких є опір матеріалів.

Базуючись в основному на теоретичній механіці і математиці, які озброюють опір матеріалів методами теоретичного аналізу явищ, що відбуваються в матеріалі під дією навантажень, опір матеріалів є основою для таких дисциплін, як “Деталі машин”, “Статика споруд”, “Інженерні конструкції” та ін. Звідси впливає найважливіша роль курсу опору матеріалів для вищої технічної освіти. Ця наука вивчається у всіх вищих і середніх технічних утворих закладах і особливо велике значення має для будівельних і машинобудівних вищих навчальних закладів.

Опір матеріалів має на меті створити практично прийнятні прості прийоми розрахунку *типових* елементів конструкцій, що найбільш часто зустрічаються. При цьому широко використовуються різні наближені методи. Необхідність довести розв’язок кожної практичної задачі до деякого чисельного результату примушує в опорі матеріалів удаватися у ряді випадків до спрощуючих гіпотез — припущень, які виправдовуються надалі шляхом зіставлення розрахункових даних з даними експерименту. У поєднанні з аналітичними методами розрахунку в опорі матеріалів вивчаються експериментальні дані, отримані в лабораторних і натурних умовах.

Опір матеріалів не вичерпує всіх питань механіки твердого тіла, що деформується. Цими питаннями займаються такі суміжні дисципліни, як будівельна механіка стержневих систем, теорія пружності, теорія пластичності, теорія повзучості. На основі загальних положень опору матеріалів створені нові розділи науки про міцність, що мають конкретну практичну спрямованість. Сюди відносяться будівельна механіка споруд, будівельна механіка літака, теорія міцності зварних конструкцій та багато інших.

Методи опору матеріалів не залишаються сталими. Вони змінюються разом з виникненням нових завдань і нових вимог практики. При проведенні інженерних розрахунків методи опору матеріалів слід застосовувати творчо і пам'ятати, що успіх практичного розрахунку полягає не стільки у застосуванні складного математичного апарату, скільки в умінні проникати у суть досліджуваного об'єкту, знаходити найбільш вдалі спрощуючі припущення і доводити розрахунок до остаточного чисельного результату.

1.2. Історична довідка про розвиток науки «Опір матеріалів»

Наука “Опір матеріалів” веде свій початок від опублікованої в 1638 році роботи Галілео Галілея “Бесіди про дві нові науки” (“Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze...”, Лейден, Голландія). Інший знаменитий італієць — Леонардо да Вінчі (1452–1519) також успішно досліджував ряд питань, що відносяться до опору матеріалів. Проте його роботи не були опубліковані і залишилися невідомими, а тому і не мали впливу на розвиток даної галузі науки. Італія часів Галілея переживала епоху промислового і наукового підйому. Тут в 1560 році була створена перша в світі академія природознавчих наук, і тому абсолютно зрозуміло, що саме в Італії народилася нова наука, така важлива для всіх інженерних дисциплін. Сам Галілей був у той час професором математики в Падує і був причетний до робіт венеціанського арсеналу, перед яким було поставлене завдання спорудження військових суден (галер) більшого розміру, чим будувалися раніше. Можливо, що саме це стало стимулом для постановки цілої серії дослідів з міцності дерев'яних балок, на основі яких Галілей і зробив певні висновки. Слід підкреслити, що вже на початку свого розвитку наука про опір матеріалів являла собою гармонійне поєднання теорії з практикою.

Нова економіка того часу поставила на чергу вирішення ряду нових технічних проблем. Пожвавлення зовнішніх торгових стосунків поставило завдання збільшення тоннажу суден, а це спричинило необхідність зміни їх конструкції; одночасно стало питання про реконструкцію і створення нових внутрішніх водних шляхів сполучення, включаючи побудову каналів і шлюзів. Ці технічні завдання не могли бути вирішені простим копіюванням конструкцій суден і споруд, що існували раніше; виявилось необхідним навчитися шляхом розрахунку оцінювати міцність елементів конструкції в залежності від їх розмірів і навантажень на них.

Значна частина робіт Галілея була присвячена вирішенню задач про залежність розмірів балок і стержнів від тих навантажень, які можуть витримати ці елементи конструкцій. Галілей зробив заяву, що отримані ним результати можуть “принести велику користь при спорудженні крупних суден, особливо при зміцненні палуб і покриттів, оскільки у спорудах цього роду легкість має величезне значення”.

Природно, що не все у дослідях і висновках Галілея було правильним, але сам метод розв'язку задачі, запропонований ним, виявився надзвичайно плідним. Галілей вказав на дуже важливу обставину — питання міцності споруд вимагають урахування не тільки геометричних розмірів, але і знання фізичних властивостей будівельних матеріалів.

Надалі серед вчених, що продовжували розвивати науку про опір матеріалів, були фізики, механіки, математики, військові інженери, інженери-мостовики і будівельники залізниць, кораблебудівники, цивільні інженери. Багатогранність науки про опір матеріалів призводила до того, що нею в тій або іншій ступені переймалися вчені і інженери численних спеціальностей. В міру того, як промислова революція висувала на перше місце Англію, потім

Францію і Німеччину, в розвитку науки про опір матеріалів брали участь вчені різних країн.

Р.Гук (1635–1703) — англійський вчений, працював з 1662 року механіком Королівської наукової спілки (англійська академія наук, створена в 1660 році). У 1678 році Роберт Гук надрукував результати своїх досліджень з деформації пружин різного типу. Основний закон, що характеризував пружні деформації матеріалів, був відкритий Гуком в 1660 році. Цей закон був надрукований у формі анаграми “ceiinossttuv”, яку він потім розшифрував так: “ut tensio sic vis” (яке напруження, така і сила). Це була своєрідна форма закріплення за собою пріоритету відкриття.

Е.Маріотт (1620–1684) — французький фізик, один з перших членів-засновників французької академії наук, створеної в 1666 році, розглядав питання міцності балок і пластинок при згинанні, а також міцність тонкостінних труб під внутрішнім тиском. В механіці твердих тіл побудував теорію удару. Маріотт висловив припущення, що причиною руйнування матеріалу є дуже велика лінійна деформація. Ця гіпотеза лягла в основу однієї з теорій міцності.

Я.Бернуллі (1654–1705) — голландець за народженням, швейцарець за громадянством вирішив задачу про центр гойдань методом, що передбачив принцип Д’Аламбера, визначив форму зігнутої осі пружного стержня при згинанні і опір тіл різної форми, що рухаються у рідині.

Л.Ейлер (1707–1783) — швейцарець за народженням, російський вчений, тому, що більшу частину свого життя жив і працював в Росії. В 13 років він поступив в університет Базеля, в 16 років отримав ступінь магістра. У 20 років був запрошений професором у Петербурзьку Академію наук (Російська Академія наук була створена Петром I в 1725 році. Серед перших її академіків були брати Микола і Данііл Бернуллі, які і запросили Ейлера до Петербургу). Ейлер працював в Академії наук 45 років — з 1727 по 1783 рік. Ейлер — один з найвидатніших математиків і механіків всіх часів. В області опору матеріалів йому належить дуже важливе дослідження форм пружних кривих (1744) і вирішення задачі про стійкість гнучкого стиснутого стержня (1757). Ейлер написав стільки робіт, що протягом 40 років після його смерті Петербурзька Академія продовжувала їх публікацію. В останній період свого життя (17 років) Ейлер втратив зір, але продовжував працювати, і кількість і якість його робіт за цей період аніскільки не зменшилася. Все життя Ейлера являє собою яскравий приклад беззавітного служіння науці.

Ш.О.Кулон (1736–1806) — французький військовий інженер, найкрупніший вчений XVIII сторіччя в області механіки пружного тіла. Досліджував згинання балок, стискання колон, кручення, крутильні коливання. Розроблена ним теорія підпірних стінок дотепер не втратила своєї цінності.

Л.М.А.Нав’є (1785–1836) — видатний французький вчений і інженер-мостобудівник. Відомий головним чином своїми роботами в області теорії

пружності. Глибоко вивчав теорію і практику мостобудування. Першим встановив загальний метод вирішення статично невизначуваних задач. Ним також були розглянуті деякі задачі поздовжньо-поперечного згинання стержнів і розрахунку простих оболонки. Саме Нав'є є засновником методу розрахунку конструкцій за руйнівними станами, а не за граничними станами, як це було прийнято до нього з часів Галілея.

Ж.В.Понселе (1788–1867) — французький вчений і інженер, першим запровадив у практику випробування матеріалів побудову діаграми розтягання і звернув увагу на необхідність особливих випробувань матеріалу на динамічну дію навантаження. Понселе першим дослідив поздовжній удар і поздовжні коливання стержня, а також явище передчасного руйнування матеріалів під дією змінних навантажень.

Т. Юнг (1773–1829) — англійський вчений, лінгвіст (у 14 років він знав не тільки сучасні мови, але і латинську, грецьку, арабську, перську, єврейську), філософ і математик, зробив значний внесок в науку про опір матеріалів. Він впровадив вперше поняття про модуль пружності, встановив наявність поперечних деформацій при розтяганні та стисканні стержня, встановив поняття границі пропорційності, розглянув досить складні задачі з кручення і розтріскування колон, цікавився питаннями ударної дії навантажень і здійснив вирішення деяких задач позацентрового стискання.

Вельми колоритною фігурою серед своїх сучасників був французький вчений інженер-мостобудівник Барре де Сен-Венан (1797–1886). Будучи студентом політехнічної школи в Парижі, він в 1814 році був мобілізований в армію; про відкритий виступ проти узурпатора був оголошений дезертиром і не зміг закінчити курс навчання в школі. Протягом 8 років після цього працював у промисловості, і в 1823 році за клопотанням уряду був зарахований до Школи мостів і доріг без іспиту. Сен-Венан відвідував всі лекції і закінчив курс першим. Проте вороже відношення до нього багатьох його однолітків гальмувало просування Сен-Венана як вченого і інженера. Лише у 1837 році його запросили в ту саму Школу мостів і доріг для викладення лекцій з опору матеріалів. Сен-Венан зумів довести практичну цінність теорії пружності для вирішення інженерних задач, досяг значних успіхів в теорії кручення некруглих стержнів і теорії згинання прямих і кривих брусів. Він дотримувався у своїх розрахунках так званої другої теорії міцності, і саме завдяки його працям ця теорія довгий час широко застосовувалася в інженерних розрахунках. У 1868 році Сен-Венан був обраний членом Паризької Академії наук і керував в ній відділом механіки 18 років до самої смерті. Роботи Сен-Венана в області опору матеріалів, теорії пружності і теорії пластичності мали величезний вплив на розвиток цих наук.

У Росії опір матеріалів почав розвиватися з 1725 року, коли в Петербурзі Петром I була створена Російська Академія наук. Серед її перших академіків був видатний математик і механік Л.Ейлер. Майже в цей самий час в Академії наук працював і М.В.Ломоносов (1711–1765). Його різносторонній розум торкався різних галузей науки. Ломоносову належить

запровадження терміну “пружність”, він виконав експериментальне вивчення міцності деяких матеріалів і наполегливо пропагував необхідність широкого розвитку дослідів і тісної ув'язки теорії і практики.

Сучасником Ейлера був і геніальний російський механік-самоучка І.П.Кулібін (1735–1818), який працював з 1769 по 1801 рік на посаді механіка при Академії наук в Петербурзі. Ему належить оригінальний проект однопрогонового арочного мосту через Неву в Петербурзі прольотом 300 м, виготовленого з дерева, такого, що далеко випереджав конструкції мостів, що застосовувалися у той час. Кулібін не тільки спроектував міст, але і побудував його модель в 1/10 натуральної величини і випробував її під навантаженням у присутності урядової комісії, у складі якої був і Л.Ейлер (1776 рік). Модель під навантаженням в 3870 пудів простояла 28 днів, не виявляючи ніяких змін. Цей проект Кулібіна наробив багато галасу і за кордоном. Кулібінська модель проіснувала більше 30 років, виконуючи протягом останніх років роль одного з мостів Таврійського саду, але міст через Неву побудований так і не був. Цікаво відзначити, що Кулібін при випробуванні своєї моделі абсолютно правильно вирішив задачу про редукування навантаження відповідно до лінійного масштабу моделі. Всі його розрахунки були перевірені і схвалені Ейлером. Таким чином, Кулібіна можна вважати засновником наукової теорії моделювання.

До цього періоду відноситься і поява перших підручників російською мовою з механіки і опору матеріалів. У 1774 році була надрукована книга С.К.Котельникова. Ця книга була курсом механіки і містила у собі серед інших питань розрахунок висячого мосту за допомогою ланцюгової лінії і дослідні дані про міцність дроту, дерева і канатів. У 1837–1838р.р. М.Ф.Ястржембським був опублікований перший курс з опору матеріалів. У 1810 році у Петербурзі був започаткований перший вищий технічний навчальний заклад — Інститут інженерів шляхів сполучення. Першим російським професором будівельної механіки був М.С.Волков (1802–1878), один з засновників залізничної справи в Росії. Російські вчені і інженери внесли значний внесок в подальший розвиток науки про опір матеріалів. Не можна не згадати тут Д.І.Журавського (1821–1891), що багато працював в галузі теорії і практики мостобудування і просунув вперед теорію розрахунку балок при згинанні, А.В.Гадоліна (1828–1892), який розробив теорію розрахунку скріплених труб, Х.С.Головіна (1844–1904), який дав точне вирішення складної задачі про напруження при згинанні кривого бруса, Н.А.Белелюбського (1845–1922), видатного мостобудівника і творця найбільшої механічної лабораторії з випробування механічних властивостей матеріалів (Н.А.Белелюбський протягом декількох років був головою Міжнародної спілки з випробування матеріалів). Серед сконструйованих ним і потім побудованих мостів (всього більше 50) — мости через Волгу у Сизрані і через Дніпро у Єкатеринославі.

Серед вчених, які розвивали опір матеріалів наприкінці ХІХ і на початку ХХ сторіччя слід назвати В.Л.Кирпічева (1845–1913), який написав курс з опору

матеріалів, який не втратив інтересу і до теперішнього часу, Ф.С.Ясинського (1856–1899) — творця практичних методів розрахунків на стійкість, І.Г.Бубнова (1872–1919) — засновника будівельної механіки корабля.

Світову популярність здобули роботи Б.Г.Гальоркіна (1887–1946), О.Н.Дінника (1876–1950), П.Ф.Папковича (1887–1946), М.М.Беляєва (1890–1944), О.М.Крилова (1863–1945). Такі абсолютно нові методи розрахунку, як розрахунки за граничними станами, статистичні методи визначення напружень і навантажень, розрахунок на міцність і стійкість тонкостінних стержнів відкритого і замкнутого профілів, розрахунки на динамічну міцність і стійкість, розрахунки пластинок і оболонок, теорія контактних напружень і багато інших, розроблених в першу чергу працями В.З.Власова, М.С.Стрілецького, Й.І.Воровича, М.В.Корноухова, І.Я.Штаермана, Ю.М.Работнова, А.С.Вольміра, С.Д.Пономарьова, В.В.Болотіна, В.І.Феодосьєва та ін.

Значний вклад у розвиток будівельної механіки внесли українські вчені С.П.Тимошенко, Г.С.Писаренко, Б.М.Горбунов, В.О.Кононенко, В.А.Лазарян, Ю.О.Митропольский, В.В.Панасюк, Є.О.Патон, В.І.Мосаковський, Г.М.Савін та ін.

Джерела: огляди про історію розвитку науки «Опір матеріалів» [1] [9].

1.3. Три задачі опору матеріалів

Опір матеріалів є загально інженерною дисципліною, що вирішує три задачі:

1. Викладення методів розрахунку конструкцій на *міцність*. *Міцність* — здатність елементів конструкцій і деталей машин чинити опір зовнішнім навантаженням, не руйнуючись.

2. Викладення методів розрахунку елементів конструкцій і деталей машин на *жорсткість*. *Жорсткість* — здатність елементів конструкцій і деталей машин чинити опір зовнішнім навантаженням без суттєвих деформацій. *Деформація* — зміна форми і розмірів конструкції при дії навантаження.

3. Викладення методів розрахунку стиснутих елементів конструкцій і деталей машин на *стійкість*. *Стойкість* — здатність конструкції та її елементів зберігати певну початкову форму пружної рівноваги при стисканні.

1.4. Уявлення про розрахункову схему. Три групи схематизації

Розрахунковою схемою конструкції є реальний об'єкт, позбавлений несуттєвих особливостей з точки зору опору матеріалів. До числа суттєвих факторів розрахункової схеми відносять: геометрію об'єкта, його форму і розміри; фізичні характеристики матеріалу; навантаження, що прикладаються до об'єкта.