

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

На правах рукопису

**ЧЕЧИН Едуард Васильович**

УДК 621.791.052

**Розробка енергетичного методу визначення  
допустимих напружень, що забезпечує  
зниження металомісткості конструкцій**

Спеціальність: 05.02.07: Механіка деформованого  
твердого тіла

**Автореферат**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук



Київ 1997

AB 37.057

Дисертація є рукописом.  
Робота виконана в Інституті проблем міцності Національної академії наук України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
В.О.Стрижало

Офіційні опоненти:	
доктор технічних наук, професор	М.І.Бобир
доктор технічних наук, професор	Г.В.Степанов
доктор технічних наук	В.О.Бастун

Провідна організація: Інститут електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України, м.Київ

Захист відбудеться "20" березня 1997 р. о 9 год.30 хв. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.99.01 при Інституті проблем міцності НАН України за адресою:  
252014, м.Київ-14, вул.Тімірязєвська, 2

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту проблем міцності НАН України

Автореферат розіслано "13" лютого 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
доктор технічних наук

Ф.Ф.Гігіня

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751695 (X)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Зниження металомісткості конструкцій і машин завжди було однією із головних проблем розвитку машинобудування та будівництва. У вирішенні цієї проблеми, нарівні з розробкою і застосуванням нових, більш міцних, матеріалів, створенням прогресивних типів конструкцій та удосконаленням технології їх виготовлення, найбільш важливе значення в науковому та практичному відношенні має удосконалення методів розрахунку на міцність.

Традиційний силовий метод розрахунку на статичну міцність за допустимими напруженнями, ідея якого була висловлена Нав'є 170 років тому (до промислового освоєння виробництва сталей), вже удосконалювався з метою більш ефективного використання конструкційних матеріалів. Ці удосконалення були здійснені через широке застосування в будівництві та машинобудуванні пластичних сталей і сплавів. В результаті були розроблені метод розрахунку за руйнівними навантаженнями (ідея запропонована Лолейтом у 1904 р.) і метод розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами (розроблений під керівництвом Стрелецького в 1953 р.). Ці методи навіть при неявному врахуванні в розрахунках пластичності матеріалів дозволили підвищити ефективність їх використання.

Подальший розвиток техніки, зокрема криогенного машинобудування, і розширення області застосування конструкційних матеріалів, що суттєво відрізняються не тільки характеристиками, але й ресурсом пластичності, деформаційним і низькотемпературним зміцненням, а також тріщиностійкістю (в'язкістю руйнування), особливо чітко проявили недоліки силового методу як такого, що не забезпечує раціональне використання пластичних, зміцнюваних і холодостійких матеріалів. Такі матеріали дозволяють створити більш надійні конструкції, ніж високоміцні, але малопластичні, і для них логічно було б визначити менші величини коефіцієнтів запасу міцності (більші значення допустимих напружень). Однак, у відповідності з діючими нормативними документами, допустимі напруження визначаються тільки з використанням характеристик міцності при суворо детермінованих коефіцієнтах запасу міцності незалежно від типу матеріалу. Недосконалість силового методу проявляється також і в розрахунках на міцність конструкцій, призначених для роботи в умовах криогенних температур. У цьому випадку міцність матеріалів зростає, а пластичність та тріщиностійкість, як правило, знижується, і при відсутності обгрунто-

ваного механізму обліку таких змін силовий метод не забезпечує об'єктивного використання низькотемпературного зміцнення холодостійких сталей та сплавів.

В умовах початої у 80-і роки модернізації силового методу (Лебедев, Новиков), коли відсутній єдиний принцип у визначенні допустимих напружень при кімнатній і низьких (криогенних) температурах, особливо актуальною стала розробка енергетичного методу визначення допустимих напружень, що забезпечує облік комплексу механічних характеристик матеріалів з єдиних позицій при різних температурах.

Без розробки такого методу неможливо об'єктивно обґрунтувати диференційоване підвищення допустимих напружень для пластичних, зміцнюваних і холодостійких сталей та сплавів і вирішити проблему зниження металомісткості конструкцій та забезпечення їхньої однаково надійної роботи у різних температурних умовах.

**Мета роботи.** Перша - розробка енергетичного методу визначення допустимих напружень з урахуванням ресурсу пластичності, деформаційного та низькотемпературного зміцнення, а також тріщиностійкості (в'язкості руйнування) конструкційних матеріалів, що забезпечує диференційоване підвищення допустимих напружень.

Друга - експериментальне підтвердження правомірності використання енергетичного методу на прикладі результатів випробувань посудин тиску із матеріалів різних класів міцності при кімнатній та криогенній температурах.

У відповідності з поставленими цілями в роботі сформульовані і вирішені такі задачі:

- аналітично обґрунтований спосіб обліку фактичних механічних властивостей матеріалів: ресурсу пластичності, деформаційного та низькотемпературного зміцнення при визначенні допустимих напружень за енергетичним методом;

- розроблені узагальнені енергетичні параметри, що характеризують енергопоглинання матеріалів, їхню спроможність деформаційного зміцнення при кімнатній температурі і їхню спроможність зміцнення при криогенних температурах, а також такі параметри, що забезпечують визначення поправок до номінальних допустимих напружень на основі єдиного енергетичного принципу;

- розроблені нові методики дослідження міцності та деформаційності напівсферичних елементів посудин, крупномасштабних моделей і натурних посудин при навантаженні внутрішнім тиском

в умовах кімнатної та криогенних температур, і створений комплекс експериментальних установок для випробувань напівсфер в діапазоні температур 293...4,2 К, а також пневмогідралічний криогенний стенд для випробувань крупномасштабних моделей і натурних посудин в діапазоні температур 293...77 К при статичному та циклічному навантаженні внутрішнім тиском;

- досліджено конструкційну міцність та довговічність моделей і натурних тонкостінних посудин тиску із сталей та сплавів різних класів міцності і установлені фактичні запаси їхньої міцності при кімнатній та криогенних температурах, що підтверджують правомірність застосування енергетичного методу в практиці розрахунків конструкцій на міцність.

**Наукова новизна роботи.** Обґрунтована енергетична концепція кількісного обліку комплексу основних механічних властивостей конструкційних матеріалів при визначенні допустимих напружень - головної ланки розрахунку конструкцій на міцність.

На основі цієї концепції розроблений енергетичний метод визначення допустимих (розрахункових) напружень, який, завдяки аналітично обґрунтованому механізму кількісного обліку і перетворення із якісних характеристик в розрахункові, ресурсу пластичності, деформаційного і низькотемпературного зміцнення, а також в'язкості руйнувань (тріщиностійкості), забезпечує диференційоване підвищення рівня цих напружень для конструкційних матеріалів і відповідне зниження металомісткості конструкцій. Це підвищення допустимих напружень рівнозначне автоматичній корекції у бік зменшення коефіцієнтів запасу міцності, коли вони із величин суворо нормованих стають залежними від комплексу фактичних механічних властивостей конкретного матеріалу. Крім того, застосування енергетичного методу виключає необхідність вживання емпіричних залежностей, розроблених в ряді країн для визначення допустимих напружень, або коефіцієнтів запасу міцності для аустенітних сталей та кольорових металів.

Використання єдиного енергетичного принципу врахування резервів міцності сталей та сплавів при різних температурах дозволяє врахувати їхнє деформаційне та низькотемпературне зміцнення при визначенні допустимих напружень і сприяє створенню однаково міцних та однаково надійних конструкцій для роботи в різноманітних температурних умовах, тобто, енергетичний метод є загальним варіантом визначення допустимих напружень, по відношенню до якого традиційний силовий виступає окремим випадком.

Здійснена систематизація конструкційних матеріалів різних класів міцності за рівнем деформаційного зміцнення і побудована універсальна діаграма зміцнення сталей та сплавів, використання якої дозволяє оцінити наявність резервів міцності у матеріалів і виявити ті з них, котрим необхідна оптимізація співвідношення механічних характеристик металургійним або технологічним способами для більш повного їх використання. Універсальна діаграма відкриває також можливість скорочення номенклатури існуючих марок матеріалів з близькими значеннями механічних характеристик.

Розроблені нові узагальнені енергетичні параметри, одні з яких забезпечують врахування деформаційного і низькотемпературного зміцнення матеріалів, а другі - врахування резервів міцності матеріалів, що залежать від прийнятих у конкретній галузі промисловості нормативних коефіцієнтів запасу міцності.

**Практична цінність роботи.** Енергетичний метод визначення допустимих напружень доведений до інженерного застосування в практиці розрахунків на міцність. Він має переваги перед традиційним силовим методом, оскільки забезпечує диференційоване підвищення допустимих напружень для різних конструкційних сталей та сплавів в інтервалі до 30 % при кімнатній температурі і до 50 % - при криогенних температурах, і, як наслідок, дозволяє радикально знизити металомісткість та вартість виготовлених конструкцій без зниження їхньої надійності.

Створена експериментальна база, що включає комплекс оригінальних установок, які забезпечують проведення випробувань елементів посудин, створений пневмогідролічний криогенний стенд, який дозволяє проводити випробування крупномасштабних моделей та натурних посудин у широкому інтервалі низьких температур при статичному і циклічному (в автоматичному режимі) навантаженні внутрішнім тиском з використанням сучасних засобів управління, контролю та реєстрації параметрів випробувань.

Одержано та узагальнено великий об'єм експериментальних даних про фактичні запаси міцності та довговічності натурних посудин тиску і їхніх крупномасштабних моделей із різних матеріалів при кімнатній та криогенних температурах. Ці експериментальні дані підтверджують обґрунтованість застосування енергетичного методу в практиці розрахунків. Вони є також надійною довідковою інформацією для розрахунків та оптимального конструювання виробів відповідального призначення.

Частина експериментальних досліджень послужила основою для розробки галузевого стандарту ОСТ-04-2585-80.

Результати, одержані в процесі виконання даної роботи, впроваджені або передані для впровадження в організації, що розробляють та створюють нову техніку (НПО "Енергія", НПО "Кріогенмаш").

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень обговорювались на I Всесоюзному симпозіумі "Сталі та сплави кріогенної техніки" (Батумі, 1975); Всесоюзній нараді "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при складному напруженому стані" (Київ, 1977); Республіканській науково-технічній конференції "Підвищення ефективності та надійності трубопровідного транспорту на Україні" (Львів, 1978); II Всесоюзній нараді "Актуальні проблеми зварювання в кріогенному машинобудуванні" (Київ, 1979); на V з'їзді з теоретичної та прикладної механіки (Одеса, 1982); на Республіканській нараді з питань надійності та довговічності (Київ, 1982); Всесоюзній науково-технічній конференції "Міцність матеріалів та конструкцій при низьких температурах" (Київ, 1982); II Всесоюзному симпозіумі "Сталі та сплави кріогенної техніки" (Батумі, 1983); Засіданні науково-методичної комісії з питань стандартизації в області механіки руйнування (Челябінськ, 1983); Міжнародній конференції "Кріогенні сплави та їх зварювання" (Київ, 1984); II, III симпозіумах "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при складному напруженому стані" (Київ, 1984; Житомир, 1989); III Всесоюзній конференції "Міцність матеріалів та конструкцій при низьких температурах" (Вінниця, 1991); Міжнародній конференції з питань кріогенного машинобудування (Боулдер, США, 1977); Міжнародній конференції "Механічні властивості і руйнування сталей при низьких температурах" (С-Петербург, 1996).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковані в 49 наукових статтях та в одній монографії. За результатами виконаних методичних розробок одержано два авторських свідоцтва.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5-ти глав, висновків, списку використаної літератури та додатку з даними про технічне впровадження. Робота включає 212 сторінок машинописного тексту, 75 ілюстрацій, 9 таблиць і список літератури із 282 найменувань.

**Особистий вклад автора.** Автором розроблена нова енергетична концепція використання комплексу фактичних механічних властивостей конструкційних матеріалів при визначенні

допустимих (розрахункових) напружень і енергетичний метод визначення допустимих напружень, що базується на цій концепції та забезпечує радикальне зниження металомісткості конструкцій; розроблені експериментальні установки і методики проведення випробувань на них, одержані експериментальні результати, що підтвердили правомірність використання в практиці розрахунків на міцність енергетичного методу замість традиційного силового.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрита актуальність роботи, указані нові наукові положення, які виносяться на захист, відмічена наукова новизна і практична значимість результатів роботи.

У першій главі наведено огляд методів розрахунку на міцність від первинного, коли розрахунок будівель та споруд великою несучою спроможністю, до широко розповсюджених у машинобудуванні та будівництві методів розрахунку за допустимими напруженнями, за руйнівними навантаженнями і за граничними станами. Розглянуті недоліки та досягнення цих методів. Наведені приклади розрахунку оболонкових конструкцій у співвідношенні їх до методів, що аналізуються.

Відмічено, що широко вживаний при розрахунку машинобудівних конструкцій традиційний силовий метод розрахунку за допустимими напруженнями при їхньому визначенні має такі суттєві недоліки, як використання тільки характеристик міцності при суворо детермінованих в різних галузях промисловості коефіцієнтах запасу міцності. Даний метод не дозволяє також обґрунтовано використовувати низькотемпературне зміцнення холодостійких матеріалів. Ці недоліки особливо чітко проявились у зв'язку з великою різноманітністю застосовуваних у сучасній промисловості конструкційних сталей та сплавів і приводять до їх нерационального використання, особливо пластичних, таких, що значно зміцнюються, в тому числі і холодостійких.

Зроблено висновок про необхідність радикальної модернізації методу визначення допустимих напружень як основної ланки розрахунку на міцність для виключення необґрунтованих перевитрат багатьох конструкційних матеріалів. На основі аналізу стану досліджень з даної проблеми сформульовані цілі та задачі роботи.

Друга глава присвячена розгляду енергетичних параметрів, що визначають енергетичні ресурси конструкційних матеріалів, і обґрунтуванню способу систематизації металевих матеріалів за механічними властивостями.

Проведений в роботі аналіз існуючих критеріїв оцінки працездатності конструкційних матеріалів показав, що інтегральна, на основі енергетичного підходу, оцінка здатності матеріалів чинити опір деформуванню та руйнуванню є найбільш прийнятною. Як показник працездатності матеріалу, що враховує його міцність і пластичність, а також здатність до деформаційного та низькотемпературного зміцнення, прийнята величина роботи пластичної деформації - енергопоглинання матеріалу (ЕПМ) у зоні рівномірної деформації зразка, яку в загальному вигляді визначаємо згідно рівняння:

$$w_B = \int_0^{\epsilon_B} \sigma d\epsilon, \quad (1)$$

або при кусково-лінійній апроксимації діаграми розтягу як

$$w_B = (\sigma_{0,2(T)} + \sigma_B) \epsilon_B / 2, \quad (2)$$

де  $\sigma_{0,2(T)}$ ,  $\sigma_B$  - границі текучості і міцності,  $\epsilon_B$  - рівномірна відносна пластична деформація.

Для оцінки фактичного резерву міцності конструкційних матеріалів, пов'язаного з наявністю деформаційного зміцнення, а також з тим, що допустимі напруження складають означену (в залежності від величини прийнятого в даній галузі промисловості коефіцієнту запасу міцності) частину границі текучості матеріалу, загальну величину ЕПМ подаємо у вигляді трьох умовних складових частин (рис.1):  $w_{\sigma_1} = \int_0^{\sigma_1^H} \epsilon_B -$  "використовувана" частина ЕПМ (на рівні прийнятих нормативних допустимих напружень;  $\Delta w_2 = \sigma_{0,2} - \int_0^{\sigma_1^H} \epsilon_B -$  "невикористовуваний" резерв ЕПМ, числове значення якого дорівнює різниці величин площ на рівнях границі текучості та допустимого напруження;  $\Delta w_1 = w_B - \sigma_{0,2} \epsilon_B -$  резерв ЕПМ, пов'язаний з деформаційним зміцненням матеріалу.

З метою забезпечення зручності користування (при порівнянні конструкційних матеріалів з різними значеннями резервів ЕПМ) визначені безрозмірні енергетичні параметри  $\beta_1$  і  $\beta_2$ . При цьому в значенні порівняльно-еталонного матеріалу прийнято ідеально зміцнюваний матеріал (ІЗМ), у якого при рівномірній деформації  $\epsilon_B = 1,0$  ЕПМ, пов'язане з деформаційним зміцненням матеріалу, дорівнює ЕПМ без зміцнення ( $\Delta w_u = w_u = \sigma_{0,2} \cdot 1,0$ ). Тоді безрозмірний енергетичний параметр  $\beta_1$ , що характеризує здатність будь-якого конструкційного матеріалу до деформаційного зміцнення, а, як наслідок, і резерв його міцності, визначаємо як

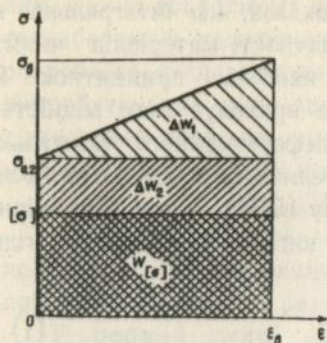


Рис. 1. Складові частини питомої роботи пластичної деформації за кімнатної температури

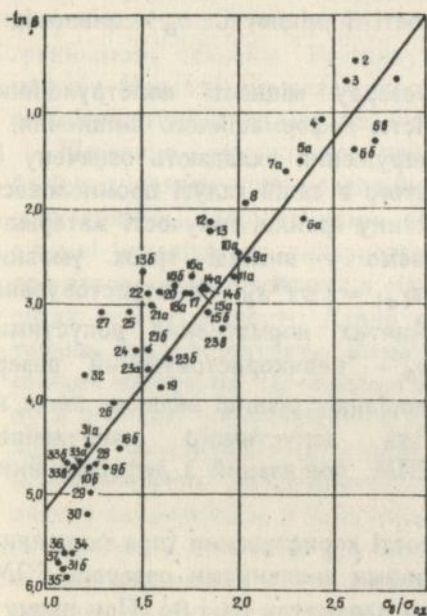


Рис. 2. Залежність параметра  $-\ln \beta_1$  від відношення  $\sigma_B / \sigma_{0.2}$  для конструкційних матеріалів (крапки - результати експериментів, суцільна лінія - залежність (5))

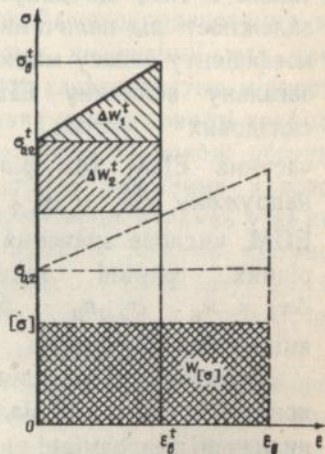


Рис. 3. Складові частини питомої роботи пластичної деформації за криогенних температур

$$\beta_1 = \frac{\Delta w_1}{w_u} = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2}) \varepsilon_B / 2}{\sigma_{0,2} \cdot 1,0} = (\sigma_B / \sigma_{0,2} - 1) \varepsilon_B / 2. \quad (3)$$

Енергетичний параметр  $\beta_2$ , що характеризує "невикористовуваний" резерв ЕПМ, що залежить від значення прийнятого в даній галузі промисловості нормативного коефіцієнту запасу міцності (вибраного номінального напруження) визначаємо як

$$\beta_2 = \frac{\Delta w_2}{w_u} = \frac{(\sigma_{0,2} - 1 \sigma_1^H) \varepsilon_B}{\sigma_{0,2} \cdot 1,0} = (1 - 1 \sigma_1^H / \sigma_{0,2}) \varepsilon_B. \quad (4)$$

Аналіз здібності конструкційних матеріалів до деформаційного зміцнення (з використанням власних та взятих з літератури результатів визначення механічних властивостей) показав, що із збільшенням значення відношення  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$  зростає і величина

параметру  $\beta_1$ . Представлення цих даних у напівлогарифмічних ко-

ординатах  $\ln \beta_1 \rightarrow \sigma_B / \sigma_{0,2}$  показало, що для досить солідного числа широко використовуваних конструкційних матеріалів (близько 40 найменувань) зміцнення, що характеризується величиною  $\ln \beta_1$ , досить добре описується залежністю (рис.2). В результаті обробки даних за методом найменших квадратів одержано рівняння у вигляді:

$$\ln \beta_1 = 2,576 (\sigma_B / \sigma_{0,2} - 3). \quad (5)$$

Встановлено, що механічні характеристики найбільш широко застосовуваних у машинобудуванні та будівництві сталей - вуглецевих, легованих і хромонікелевих, а також титанових та алюмінієвих сплавів - укладаються в діапазоні значень відношення  $\sigma_B / \sigma_{0,2} = 1,0 \dots 3,0$  і значень  $\ln \beta_1$  від -5,151 до 0 (відповідно  $\beta_1$  змінюється від 0,006 до 1,0). При цьому мінімальне значення параметру  $\beta_1$  мають загартовані сталі та титанові сплави, а максимальні - хромонікелеві сталі.

Оскільки одержана лінійна залежність характерна для матеріалів різних класів, то її можна вважати універсальною діаграмою зміцнення матеріалів (УДЗМ), а тому, що параметр  $\beta_1$  визначається основними механічними якостями матеріалу, то можна гадати, що УДЗМ являє собою геометричне місце точок, що характеризує матеріали з оптимальним поєднанням цих властивостей.

Відмічено, що здійснена систематизація конструкційних матеріалів за рівнем деформаційного зміцнення на основі кореляції між параметром енергопоглинання  $\beta_1$  і відношенням  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$  дозво-

ляє диференційовано підходити до виявлення резервів їхньої реальної міцності і відкриває шляхи оптимізації механічних властивостей сталей та сплавів як металургійним способом (долегування), так і технологічним (термічною або термо-механічною обробкою) з метою підвищення їх допустимих напружень. Крім того, вона дає наочний доказ необхідності роботи по скороченню номенклатури застосовуваних конструкційних матеріалів.

При низьких (криогенних) температурах зміцнення матеріалу для зручності його врахування представлено також у вигляді двох складових: деформаційного зміцнення (як і при кімнатній температурі), визначеного як  $\Delta w_1^t = (\sigma_B^t - \sigma_{0,2}^t) \epsilon_B^t / 2$ , і власне низькотемпературного зміцнення, що проявляється внаслідок підвищення границі текучості матеріалу при низькій температурі  $\Delta w_2^t = \sigma_{0,2}^t \epsilon_B^t - [\sigma]^H \epsilon_B$  (рис.3).

Параметр  $\beta_1^t$ , що характеризує деформаційне зміцнення матеріалу при низькій температурі, визначаємо подібно знаходженню аналогічного параметру при кімнатній температурі. Однак, тут немає повної аналогії, оскільки і в цьому випадку частину ЕПМ, зв'язану з деформаційним зміцненням при низькій температурі,  $\Delta w_1^t$ , визначеної при кімнатній температурі:

$$\beta_1^t = \frac{\Delta w_1^t}{w_u} = \frac{(\sigma_B^t - \sigma_{0,2}^t) \epsilon_B^t / 2}{\sigma_{0,2}} = \frac{(\sigma_B^t - \sigma_{0,2}^t) \epsilon_B^t}{2 \sigma_{0,2}} \quad (6)$$

Параметр  $\beta_2^t$ , що характеризує резерв ЕПМ, зв'язаний з підвищенням границі текучості матеріалу при криогенній температурі, визначаємо як

$$\beta_2^t = \frac{\Delta w_2^t}{w_u} = \frac{\sigma_{0,2}^t \epsilon_B^t - [\sigma]^H \epsilon_B}{\sigma_{0,2}} \quad (7)$$

Відмічено, що, коли параметри  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  і  $\beta_1^t$  завжди мають позитивне значення, то параметр  $\beta_2^t$  може приймати як позитивне, так і негативне значення. Отже, при визначенні поправок до допустимого напруження (див. главу 3), пропорційних параметру  $\beta_2^t$ , їх знак буде визначатися знаком цього параметра.

**У третій главі** представлено енергетичний метод визначення допустимих напружень, який, на відміну від традиційного силового методу, враховує ресурс пластичності, деформаційне та низькотемпературне зміцнення, а також в'язкість руйнування (тріщиностійкість) матеріалу і забезпечує перетворення їх із якісних характеристик у розрахункові.

Допустимі напруження в цьому випадку знаходимо як суму вихідного (номінального) значення допустимого напруження  $(\sigma^H)$  і поправок  $(\Delta\sigma)_1$  і  $(\Delta\sigma)_2$ , що враховують резерви фактичної міцності матеріалу:

$$(\sigma)^e = (\sigma)^H + (\Delta\sigma)_1 + (\Delta\sigma)_2. \quad (8)$$

Для знаходження відношень, що дозволяють визначити першу поправку  $(\Delta\sigma)_1$ , яка характеризує деформаційне зміцнення матеріалу, проведено співставлення максимальних значень поправок реального матеріалу та ідеально зміцнюваного із збереженням енергетичної подібності порівнюваних величин. В результаті були одержані аналітичні залежності для визначення поправок до номінально допустимого напруження, визначеного за границею текучості ("Т") або за границею міцності ("В"), пропорційно енергетичному параметру  $\beta_1$ .

Ці співвідношення мають вигляд:

$$(\Delta\sigma)_{1,T} = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_T / (n_T - 1)}; (\Delta\sigma)_{1,B} = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_B / (n_B - \sigma_B / \sigma_{0,2})}. \quad (9)$$

Другу поправку  $(\Delta\sigma)_2$ , що дозволяє врахувати резерв міцності матеріалу, зв'язаний з перевищенням границі текучості над вибраним у даній галузі промисловості значенням номінально допустимого напруження  $(\sigma_{0,2} - (\sigma)^H)$ , визначаємо як

$$(\Delta\sigma)_{2,T} = \frac{(\sigma_{0,2} - (\sigma)_T^H)\beta_2}{n_T}; (\Delta\sigma)_{2,B} = \frac{(\sigma_{0,2} - (\sigma)_B^H)\beta_2}{n_B}. \quad (10)$$

Остаточне рівняння для визначення величин допустимого напруження за енергетичним методом при кімнатній температурі має вигляд:

$$(\sigma)_{T(B)}^e = \min \left\{ \frac{\sigma_{0,2}}{n_T} + \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_T / (n_T - 1)} + \frac{(\sigma_{0,2} - (\sigma)_T^H)\beta_2}{n_T}; \right.$$

$$\left. \frac{\sigma_B}{n_B} + \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_B / (n_B - \sigma_B / \sigma_{0,2})} + \frac{(\sigma_{0,2} - (\sigma)_B^H)\beta_2}{n_B} \right\}. \quad (11)$$

У більш простій формі це рівняння можна записати як  $(\sigma)^e = (\sigma)^H + (\Delta\sigma)^e = (\sigma)^H(1 + \tilde{\Delta\sigma}^e)$ , де

$$\tilde{\Delta\sigma}^e = \frac{(\Delta\sigma)_1 + (\Delta\sigma)_2}{(\sigma)^H}. \quad (12)$$

Розглядаючи у рівнянні (12) вираз у круглих дужках як приведений коефіцієнт по відношенню до нормативно допустимого напруження  $(\sigma)^H$ , відмітимо, що цей коефіцієнт завжди буде

більше одиниці і буде приймати різні значення для матеріалів з різними фактичними резервами міцності.

Таким чином, комплекс основних механічних властивостей матеріалів перетворено із якісних характеристик у розрахункові.

При криогенних температурах допустимі напруження визначаємо з урахуванням низькотемпературного зміцнення матеріалу у відповідності з енергетичним принципом, так само, як і при кімнатній температурі. Ця обставина є надзвичайно важлива, оскільки при криогенних температурах, як відомо, характеристики міцності матеріалів зростають, а пластичність та тріщиностійкість знижуються. У зв'язку з цим визначення енергетичних параметрів та поправок до нормативно допустимих напружень у відповідності з єдиним енергетичним принципом сприяє створенню рівнонадійних конструкцій для роботи в різних температурних умовах.

Величину допустимих напружень тут, як і при нормальній температурі, знаходимо у вигляді суми вихідного номінально допустимого напруження та поправок, які дозволяють врахувати резерв деформаційного та низькотемпературного зміцнення матеріалу:

$$(\sigma)^{e,T} = (\sigma)^H + ((\Delta\sigma)_1^T + (\Delta\sigma)_2^T)\beta_{J,K,\delta}^T \quad (13)$$

Аналогічно визначаємо поправки  $(\Delta\sigma)_1^T$  і  $(\Delta\sigma)_2^T$  до відповідних значень номінально допустимого напруження:

$$(\Delta\sigma)_{1,T}^T = \frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T)\beta_1^T}{2n_T / (n_T - \sigma_{0,2} / \sigma_{0,2}^T)}; \quad (14)$$

$$(\Delta\sigma)_{1,B}^T = \frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T)\beta_1^T}{2n_B / (n_B - \sigma_B / \sigma_{0,2}^T)}$$

$$(\Delta\sigma)_{2,T}^T = \frac{(\sigma_{0,2}^T - (\sigma)_T^H)\beta_2^T}{n_T}; \quad (15)$$

$$(\Delta\sigma)_{2,B}^T = \frac{(\sigma_{0,2}^T - (\sigma)_B^H)\beta_2^T}{n_B}$$

Для врахування дуже важливої додаткової вимоги до конструкційних матеріалів при криогенних температурах, яка полягає в забезпеченні необхідного запасу в'язкості руйнування (тріщиностійкості) введено коефіцієнт  $\beta_{J(K,\delta)}^T$ , що дорівнює відношенню критичних значень  $J$ -інтегралу при низькій та кімнатній температурах ( $\beta_J^T = J_{1c}^T / J_{1c}$ , або  $\beta_\delta^T = \delta_c^T / \delta_c$ ). Для

високоміцних матеріалів необхідно застосувати коефіцієнт  $\beta_k^T = \kappa_{1c}^T / \kappa_{1c}$ .

У кінцевому вигляді рівняння для визначення допустимих напружень при низьких температурах на основі енергетичного методу має вигляд:

$$(\sigma_{T(B)}^{e,T}) = \min \left\{ \frac{\sigma_{0,2}^T}{n_T} + \left[ \frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T) \beta_1^T}{2 n_T / (n_T - \sigma_{0,2}^T / \sigma_{0,2}^T)} + \frac{(\sigma_{0,2}^T - (\sigma_{T(B)}^H) \beta_2^T)}{n_T} \right] \beta_{J(k,\delta)}^T \right\}; \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_B}{n_B} + \left\{ \frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T) \beta_1^T}{2 n_B / (n_B - \sigma_B / \sigma_{0,2}^T)} + \frac{(\sigma_{0,2}^T - (\sigma_{T(B)}^H) \beta_2^T)}{n_B} \right\} \beta_{J(k,\delta)}^T.$$

Це рівняння можна також записати в більш простому вигляді:

$$(\sigma_{T(B)}^{e,T}) = (\sigma_{T(B)}^H) + (\Delta \sigma_{T(B)}^{e,T}) = (\sigma_{T(B)}^H) (1 + (\tilde{\Delta} \sigma_{T(B)}^{e,T})), \quad (17)$$

де

$$(\tilde{\Delta} \sigma_{T(B)}^{e,T}) = \frac{((\Delta \sigma_{12}^T) + (\Delta \sigma_{11}^T)) \cdot \beta_{J(k,\delta)}^T}{(\sigma_{T(B)}^H)}.$$

За результатами виконаних досліджень зроблено висновок про те, що розроблений на основі енергетичної концепції механізм врахування основних механічних характеристик матеріалів і перетворення їх із якісних в розрахункові при визначенні допустимих напружень для різних температур експлуатації забезпечує одержання більш високих їх значень для тих матеріалів, у яких вищою є конструктивна якість - більший ресурс пластичності, вищим є деформаційне та низькотемпературне зміцнення, а також вищою є тріщиностійкість.

Енергетичний метод визначення допустимих напруг таким чином стає загальним у відношенні до традиційного силового. Останній є окремим випадком енергетичного, коли є поправки, що враховують резерви фактичної міцності матеріалу, згідно з цим методом, близькі до нуля.

Одержані у відповідності з енергетичним методом значення допустимих напружень дозволили визначити індетерміновані, достатні для безпечної роботи конструкції при відповідній температурі, коефіцієнти запасу міцності як

$$n^e = \frac{\sigma_{T(B)}}{(\sigma_{T(B)}^e)}. \quad (18)$$

Із цього співвідношення випливає, що чим більшою для конкретного матеріалу буде величина  $(\sigma)^e$ , тим менший коефіцієнт запасу міцності можна для нього прийняти.

Побудований за обчисленими для ряду конструкційних матеріалів значеннями  $n^e$  графік  $n^e \rightarrow \sigma_B / \sigma_{0,2} (1n \beta_1)$  (рис.4) показав, що значення індетермінованих коефіцієнтів запасу міцності  $n^e$  суттєво менші їхньої нормованої величині  $[\eta]=1,5$  при відношенні  $\sigma_B / \sigma_{0,2} > 2,0$  і значеннях  $1n \beta_1 < 2,5$ . Це свідчить про те, що для конструкцій, виготовлених із матеріалів з такими характеристиками, допустимим є суттєве зниження металоємкості без зменшення рівня їхньої надійності.

У роботі також відмічено, що завдяки використанню єдиного для різних температур енергетичного принципу врахування резервів міцності матеріалів, енергетичний метод визначення допустимих напружень сприяє створенню рівномісних та рівнонадійних конструкцій для роботи в різних температурних умовах.

Крім того, із застосуванням енергетичного методу в практиці розрахунків конструкцій на міцність відпадає необхідність використання емпіричних залежностей для визначення допустимих напружень або коефіцієнтів запасу міцності, прийнятих в ряді країн для аустенітних та кольорових сплавів.

Наочне уявлення про еволюцію методу розрахунку на статичну міцність від початкового, коли розрахунок вели за кінцевою несучою спроможністю конструкції (споруди) до енергетичного, включаючи "відгалужені" раніше від силового методу і такі більш досконалі методи, як метод розрахунку за руйнівними навантаженнями і за граничними станами, дає схема на рис.5.

У четвертій главі проведено критичний аналіз експериментальних методів і засобів випробування конструкцій оболонкового типу при кімнатній та низьких температурах, аргументована коректність прийнятої методики експериментальних досліджень, подано опис створених дослідних установок і спеціального пневмогідролічного криогенного стенду.

Для прийнятої методики дослідження об'єктами випробування обрані напівсферичні елементи посудин, крупномасштабні моделі циліндричних посудин і натурні сферичні посудини різних розмірів із заданими конструктивно-технологічними дефектами. Розроблений метод випробувань передбачає комплексне дослідження конструкційної міцності посудин при статичному та циклічному навантаженні внутрішнім тиском з визначенням

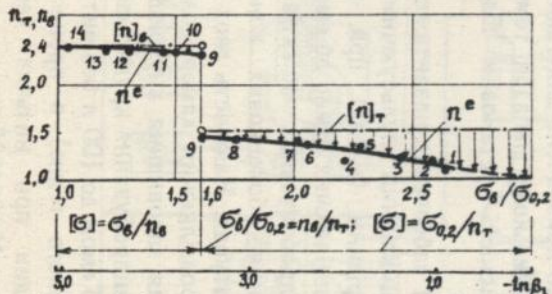


Рис. 4. Залежність індетермінованих коефіцієнтів запасу міцності  $n^e$  від відношення  $\sigma_B / \sigma_{0.2}$  та  $\ln \beta_1$ . (Крапки - розрахункові значення  $n^e$  для матеріалів: 1- 304SS; 2- 0X14Г18М; 3- X18Н12М3; 4- 1X18Н9Т; 5- 12X18Н10Т; 6- 30X10Г10; 7- 2X13; 8- сталь 20; 9- сталь 3; 10- В ст. 3 сп.; 11- А516; 12- 15Г2АФД; 13- ЭП810; 14- ВТ5-1кт.

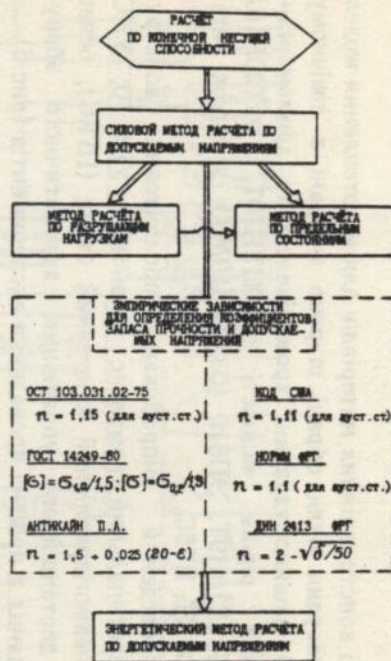


Рис. 5. Схема еволюції методу розрахунку на статичну міцність

фактичних запасів міцності, з оцінкою впливу при цьому низьких температур, конструктивно-технологічних факторів, виду напруженого стану.

В якості конструкційних матеріалів для виготовлення моделей і натурних посудин були обрані широко вживані в хімічному та кріогенному машинобудуванні хромонікелеві та хромомарганцеві сталі різних рівнів міцності: 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6, 03Х13АГ19, 1Х18Н9Т, ЭП810 (03Х12Н10МТ), а також титанові сплави ВТ5-І КТ, ВТ6С.

Для проведення випробувань оболонкових конструкцій створено оригінальний комплекс установок: УНС-10; УНС-20; ЦДС-1 і пневмогідролічний кріогенний стенд (ПГКС), оснащені системою дистанційного управління, автоматичного збору та реєстрації даних в процесі проведення експериментів (рис.6).

Установка УНС-10 призначена для дослідження міцності та деформованості тонкостінних елементів посудин в діапазоні температур 293-77 К, вона дозволяє проводити дослідження напівсфер діаметром до 320 мм з товщиною стінки до 3 мм при статичному та циклічному (в поєднанні з установкою ЦДС-1) навантаженні внутрішнім тиском.

Установка УНС-20 призначена для таких саме досліджень, як і УНС-10, але в більш низькому діапазоні температур-від 77 до 4.2 К.

Новизна і корисність установки підтверджена авторським свідоцтвом №423005.

Установка ЦДС-1 забезпечує навантаження елементів, моделей і натурних посудин циклічним (пульсуючим) внутрішнім тиском до 15 МПа робочої рідини (масла) при кімнатній температурі. Підключення двох розділяючих камер об'ємом по 40 л та до інших установок (або випробовуваних об'єктів) дозволяє проводити циклічні випробування оболонкових конструкцій при низьких (кріогенних) температурах. Наявність двох контурів навантаження і великого об'єму розділяючих камер дозволяє, використовуючи аморфний баласт для заповнення внутрішнього об'єму посудини, проводити циклічні випробування крупномасштабних моделей або натурних посудин об'ємом до 100 л без витрачання (втрат) робочої речовини (газоподібного гелію) в процесі випробувань. Спосіб випробування посудин при низьких температурах захищений авторським свідоцтвом №1364826.

Пневмогідролічний кріогенний стенд (ПГКС) призначений для дослідження напружено-деформованого стану і оцінки конструкційної міцності (фактичних запасів міцності)

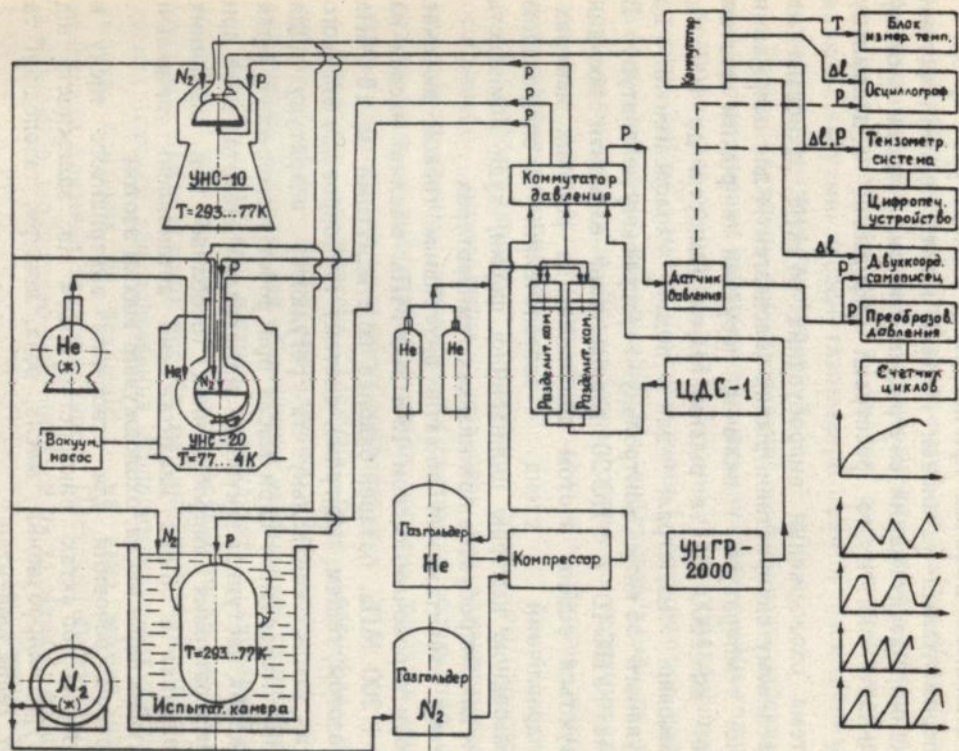


Рис. 6. Схема випробувального комплексу

крупномасштабних моделей і натурних посудин, а також трубопроводів при статичному та циклічному навантаженнях внутрішнім тиском (до 100 МПа) в діапазоні температур 293-77 К. Стенд дозволяє випробувати посудини діаметром до 600 мм, довжиною до 1000 мм при температурі 77 К і труби діаметром до 600 мм, довжиною 2500 мм при кімнатній температурі.

Експериментальні установки і стенд мають спільні системи охолодження, навантаження внутрішнім тиском, а також систему автоматичного зняття та реєстрації інформації і допоміжну систему.

Система охолодження випробуваних об'єктів заснована на безпосередньому використанні рідких холодоагентів для одержання необхідної температури і включає посудини з рідким азотом (ємністю до 1000 л) та рідким гелієм (ємністю до 100 л), теплоізольовані магістралі для подачі холодоагентів до досліджуваного об'єкту, контрольну і регулюючу апаратуру. В установках УНС-10 і УНС-20 досліджувані елементи посудин охолоджуються рідким азотом або гелієм в робочих камерах. Пневмогідрравлічний стенд забезпечений спеціальною теплоізольованою камерою циліндричної форми, куди поміщають посудини для випробувань при низьких температурах.

Система навантаження об'єктів внутрішнім тиском включає компресори з робочим тиском 15 і 100 МПа, масляні насоси на тиск 20 і 200 МПа, батареї балонів із стиснутими до 15 МПа газами (азотом, гелієм, повітрям), систему трубопроводів високого тиску, а також контрольну та регулюючу апаратуру. Для виключення намерзання пари масла при роботі компресора і для попередження наступної закупорки магістралей навантаження при низькотемпературних випробуваннях (особливо при циклічних випробуваннях) в лініях навантаження встановлені спеціальні виморожувачі парів масла, охолоджувані рідким азотом.

Як робочі речовини для створення внутрішнього тиску в досліджуваних об'єктах використовуються (в залежності від температури випробувань) масло, вода, повітря, газоподібні та рідкі азот, гелій, ізопентан.

Система автоматичного зняття і реєстрації даних складається із контрольної-вимірювальної, комутаційної і реєструючої апаратури (СИИТ-3; МАРС-100), яка дозволяє оцінити напружено-деформований стан об'єкту методом тензометрії (використовується до 100 тензорезисторів одночасно), вимірювати загальні або

локальні деформації в зонах швів і в конструктивних концентраторах, в спеціальних поверхневих надрізах.

Наведені відхилення вимірів тиску не перевищують 1%, а відхилення вимірів деформації становить 2,5% від максимального значення.

Допоміжна система стенду забезпечує теплову ізоляцію камер магістралей з рідкими холодоагентами, збір відпрацьованого гелію, безвитратне використання газоподібного азоту або гелію при циклічних випробуваннях в умовах низьких температур. Вона включає вакуумні насоси, газгольдери і рампи газоподібних азоту і гелію, систему трубопроводів.

Техніка безпеки при проведенні випробувань забезпечується тим, що установки оснащені спеціальними захисними кожухами, а стенд має дві спеціальні залізобетонні шахти завглибшки 3 м і площею 3x2 м<sup>2</sup> з накатними кришками і спеціальними жалюзі для захисту відвідних комунікацій від вибухової хвилі та осколків зруйнованих об'єктів. Всі магістралі високого тиску прокладено в захисних каналах. Приміщення для випробувань виконано у вибухобезпечному варіанті.

У роботі наведені і докладно розглянуті конструктивні особливості розроблених установок і пневмогідравлічного кріогенного стенду, використання систем та обладнання, а також подано опис методик випробування посудин та їхніх моделей в умовах кімнатної та кріогенних температур.

Створена комплексна дослідна база дозволила виконати великий об'єм експериментальних досліджень і одержати результати, достатні для об'єктивних узагальнень та висновків.

**П'ята глава** містить результати експериментальних досліджень конструкційної міцності посудин тиску, які є в переліку найбільш відповідальних виробів машинобудування, і в той же час досить зручних для проведення експериментальних досліджень в умовах, близьких до реальних, і на яких можна достовірно визначити фактичні запаси міцності. Посудини тиску, виготовлені із матеріалів, що суттєво відрізняються як за рівнями міцності, так і за ресурсом пластичності, деформаційному і низькотемпературному зміцненню та тріщиностійкості, були випробувані при статичному та циклічному навантаженні внутрішнім тиском в умовах кімнатної та кріогенної температур. Подана оцінка впливу конструкційно-технологічних та експлуатаційних факторів, віду напруженого стану, а також текстурного зміцнення титанових сплавів на величину руйнуючих

напружень (фактичних запасів міцності) і деформованість посудин при статичному навантаженні внутрішнім тиском, а також на їхню довговічність при циклічному навантаженні.

При статичному навантаженні були випробувані такі конструкції:

а) напівсферичні елементи посудин із хромонікелевих сталей 12X18H10T і 03X20H16AG6 діаметром 320 мм з товщиною стінки 1,2...1,4 мм - цільних, зварних і з поверхневими надрізами різної гостроти (радіус вершини надрізів  $\rho=1,0$  і 0,05 мм; температура випробувань - 293, 77 і 38 К;

б) крупномасштабні зварні моделі посудин циліндричної форми із: хромонікелевої сталі 12X18H10T, хромомарганцевої сталі 03X13AG19 і високоміцної хромонікелевої сталі ЕП-810 (03X12H10MT). Посудини із перших двох сталей мали діаметр 420 мм, довжину 870 мм, товщину стінки обічайки 8 мм і були виготовлені з нештатними концентраторами: напружень - подовженими (більше 200 мм) внутрішніми неповарами в подовжньому зварному шві обічайки, що разом мали до 26% від товщини стінки; випробування посудин проводили при температурі 293 і 77 К. Посудини із сталі ЕП-810 мали діаметр 380 мм, довжину 850 мм, товщину стінки обічайки - 2 мм і були виконані із штатними концентраторами напружень у вигляді імітаторів клапану, шпангоутів, а також мали повторні підварки зварних швів; температура випробувань - 293, 77 і 20 К (випробувані в НПО "Енергія");

в) натурні сферичні посудини із титанових сплавів ВТ6С (діаметр 490 мм, товщина стінки 4,3 мм) і ВТ5-1кт (діаметр 370 мм, товщина стінки 3,2 мм), із сталі 1X18H9T (діаметр 370 мм, товщина стінки 3,2 мм), із сталі 1X18H9T (діаметр 315 мм, товщина стінки 3,7 мм); температура випробувань 293 і 77 К. Ці конструкції не мали спеціально нанесених концентраторів напружень.

Крім посудин і напівсферичних елементів, із тих самих марок сталей і при тих же температурах були випробувані на розтяг листові зразки із основного металу і зі зварними швами.

Оцінку малоциклової міцності посудин проводили на таких же конструкціях (розміри ті самі), що і при статичних випробуваннях:

а) на циліндричних посудинах із сталі 12X18H10T; ці посудини мали поверхневі надрізи довжиною 120 мм, з радіусом біля вершини 5; 3 і 0,2 мм та глибиною 4,0 мм; температура випробувань 293 і 77 К;

б) на сферичних посудинах із сталі 1X19H9T з поверхневими надрізами довжиною 115 мм, з радіусом біля вершини 0,2 мм і глибиною 2,2 мм; температура випробувань 293 і 77 К;

в) на сферичних посудинах із титанового сплаву ВТ5-1кт, які мали повторні підварки зварних швів; температура випробувань 293 і 77 К.

Випробування напівсфер і посудин при статичному навантаженні тиском дозволили одержати достовірну інформацію про деформації (загальні і локальні), про фактичні коефіцієнти запасу міцності (рис.7 і 8).

Головну цінність експериментальних досліджень склали результати, одержані при випробуваннях посудин із конструкційних матеріалів різних типів. Ці результати забезпечили можливість співставлення величин відносних поправок до допустимих напружень, аналітично визначених за енергетичним методом  $[\tilde{\Delta}\sigma]^e$ , з резервами фактичної міцності конструкцій, встановленими експериментально  $[\tilde{\Delta}\sigma]^{e_{екс}} = (\sigma_p / n_B [\sigma]^H) / [\sigma]^H$ , де  $\sigma_p$  - руйнівне напруження при відповідній температурі випробувань. В табл.1 представлені деякі результати такого співставлення.

Випробування посудин із сталі 12X18H10T показали, що, незважаючи на наявність у них досить жорстких концентраторів напружень у вигляді протяжних неповарів у поздовжньому зварному шві, а також поверхневих надрізів різної гостроти, вони мають досить високі резерви міцності, які значно перевищують розрахункові поправки при кімнатній та криогенних температурах.

Суттєві резерви міцності продемонстрували також посудини із високоміцної сталі ЕП810 і титанового сплаву ВТ5-1кт, випробувані при температурі 77 К.

Можливість використання повної величини низькотемпературного зміцнення у відповідності з енергетичним методом була показана на прикладі сталі 1X18H9T ( $(\Delta\sigma)^{e,77} = 0,46 [\sigma]^H$ ) і підтверджена випробуваннями посудин сферичної форми із цієї сталі при температурі 77 К.

Експериментально визначені резерви міцності посудин, як видно із табл.1, були досить великі:  $[\Delta\sigma]^{e_{екс}77} = 1,70 \dots 1,73 [\Delta\sigma]^H$ .

Зроблено висновок про те, що для таких матеріалів допустимі напруження можна визначити з співвідношення

$$[\sigma]^{e,T} = \sigma_{0,2}^T / n_T \quad (19)$$

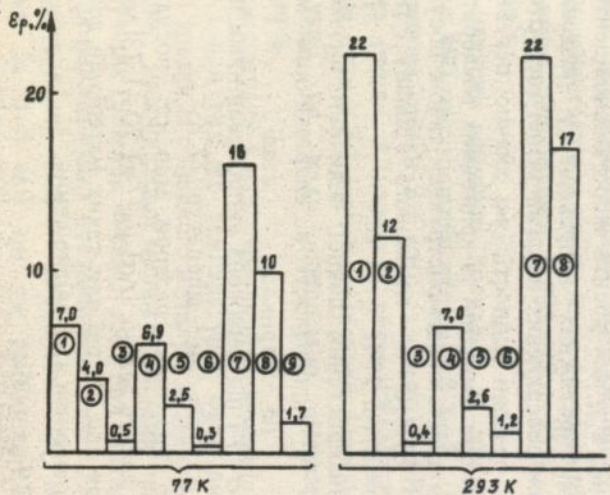


Рис. 7. Граничні деформації оболонкових конструкцій, виготовлених з різних матеріалів: 1- напівсфери із сталі 12X18H10T (основний матеріал); 2- те саме з зварними швами; 3- балони з титанового сплаву BT5-1кт; 4- посудини тиску із сталі 12X18H10T; 5- балони з титанового сплаву BT6С; 6- посудини тиску із сталі 03X13AG19; 7- напівсфери із сталі 03X20H16AG6 (основний матеріал); 8- те саме з зварними швами; 9- посудини тиску із сталі ЕП810.

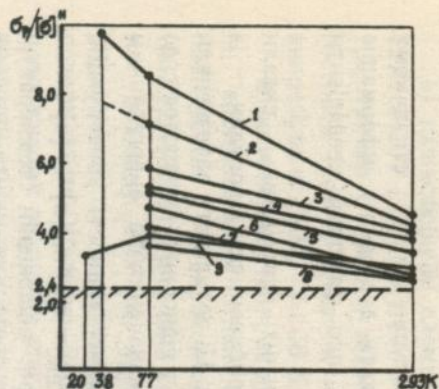


Рис. 8. Фактичні коефіцієнти запасу міцності оболонкових конструкцій, виготовлених із різних матеріалів (позначення див. рис.7)

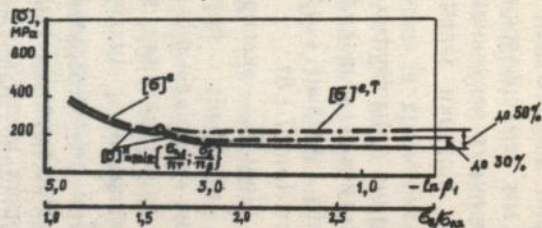


Рис. 9. Розміщення графіків допустимих напружень визначених у відповідності з силовим  $[\sigma]^H$  та енергетичним методами за кімнатної  $[\sigma]^e$  та криогенної  $[\sigma]^e, T$  температур в залежності від величини відношення  $\sigma_B / \sigma_{0.2}$  та параметра  $\ln \beta_1$

Таблиця І. Розрахункові та експериментальні значення резервів міцності і коефіцієнтів запасу міцності матеріалів у відповідності з енергетичним методом

Матеріал	T, K	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon_B$ , %	Розміри посудини, мм	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta D$ , %	$[\Delta\sigma]^e$ , %	$[\Delta\sigma]_{\text{екс}}$ , %	$n^e$	$n^e_{\text{екс}}$
ІХІ8НІ0Т	293	240	540	32	D=420	527	6,9	10	37	1,36	2,99
	77	320	1240	18	t= 8 L=870	756	7,0	22	97	1,64	3,88
304	293	220	577	79	D=380 t=12,8	429	33,1	33	58	1,13	2,92
ЭП810	293	800	950	10	D=380	1106	-	0	17	2,40	2,80
	77	1250	1400	15	t = 2 L=850	1499	1,7	15	58	3,10	3,30
ІХІ8Н9Т	293	300	670	55	D=315	626	> 10	17	31	1,28	2,67
	77	440	1760	42	t=3,7 (сфера)	1301	> 10	46	172	1,50	4,46
ВТ6С	293	689	838	10	D=490	967	2,6	0	16	3,00	3,47
	77	1274	1372	8	t=4,3 (сфера)	1500	2,6	14	79	4,31	4,71
ВТ5-Ікт	293	766	810	11	D=370	1110	0,4	0	38	3,00	4,12
	77	1212	1230	8	t=3,2 (сфера)	1415	0,5	15	75	3,96	4,56

тобто можна повністю використати низькотемпературне зміцнення матеріалу.

У роботі на прикладі результатів випробувань посудин тиску із різних матеріалів показано, що підвищення допустимих напружень при їх визначенні за енергетичним методом може складати від долей процента для високоміцних сталей та титанових сплавів до 30% для пластичних зміцнюваних сталей при кімнатній температурі. При 77 К таке підвищення може досягати майже 50%. На рис.9 наведено графіки, що описують значення допустимих напружень для ряду широко застосовуваних сталей та сплавів, визначених у відповідності з силовим і енергетичним методами при кімнатній та криогенній температурах.

За результатами випробувань посудин були співставлені також величини коефіцієнтів запасу міцності, розраховані для конкретного матеріалу у відповідності з енергетичним методом як  $n = \sigma_{0,2(B)} / [\sigma]^e$  при даній температурі, і установлені в результаті випробувань посудин  $n_{екс} = \sigma_p / [\sigma]^e$  (див.табл.1).

Таке співставлення показало, що при кімнатній температурі розрахункові значення коефіцієнтів запасу міцності для сталей 12X18H10T і 1X18H9T хоч і виявились суттєво меншими нормативного, але все-таки перевищували величину допустимого нормами коефіцієнту запасу міцності ( $n=1,1$ ) для умов випробувань і монтажу посудин тиску. Для сталі ЕП810 і титанового сплаву ВТ5-кт коефіцієнти запасу міцності при температурі 293 К лишились незмінними ( $n=2,4$  і  $3,0$ ), оскільки розрахункова прибавка до допустимого напруження для цих матеріалів дорівнює нулю.

При криогенній температурі значення експериментально установлених коефіцієнтів запасу міцності для сталей 12X18H10T, ЕП810 і сплаву ВТ5-1кт були вищими за відповідні нормативні значення.

Для сталі 1X18H9T розрахунковий коефіцієнт запасу міцності лишився рівним нормативному (1,5). Внаслідок повного використання низькотемпературного зміцнення цієї сталі величина допустимого напруження у відповідності з енергетичним методом збільшена на 46%.

Додатковим підтвердженням можливості використання низькотемпературного зміцнення сталей та сплавів при розрахунку статично навантажених конструкцій на основі енергетичного методу є результати, одержані при випробуваннях посудин при

циклічному навантаженні внутрішнім тиском в умовах температур 293 і 77 К (табл.2).

Випробування посудин були проведені при досить високих рівнях номінальних напружень, що у 2-3 рази перевищили рівень допустимих напружень, визначених енергетичним методом.

Встановлено, що для посудин із різних матеріалів число циклів до руйнування при низькій температурі було вищим, ніж при кімнатній, незважаючи на наявність досить жорстких концентраторів напружень.

Зроблено висновок про те, що проведені випробування посудин із різних конструкційних матеріалів підтвердили правомірність визначення допустимих напружень на основі енергетичного методу і обґрунтованість відповідного зниження металоємкості конструкцій із пластичних, зміцнюваних та холодостійких сталей і сплавів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вирішена важлива наукова проблема, суть - у розробці нової енергетичної концепції використання комплексу основних механічних властивостей конструкційних матеріалів при визначенні допустимих (розрахункових) напружень і в розробці нового енергетичного методу, що базується на цій концепції та забезпечує підвищення значень допустимих напружень завдяки врахуванню та перетворенню із якісних характеристик у розрахункові ресурсу пластичності, деформаційного і низькотемпературного зміцнення, а також тріщиностійкості (в'язкості руйнування) матеріалу.

2. Показано, що диференційоване підвищення значень допустимих напружень на основі енергетичного методу для конструкційних сталей та сплавів різних класів міцності знаходяться в межах до 30% при кімнатній і до 50% при криогенних температурах.

Реалізація цього методу відкриває можливість ефективного використання пластичних, зміцнюваних і холодостійких матеріалів за рахунок підвищення їхніх допустимих напружень на основі принципу "вища якість - менше втрат" і, як наслідок, радикального зниження металоємкості та вартості виготовлення конструкцій без зниження рівня надійності.

3. Здійснена систематизація конструкційних матеріалів за рівнем деформаційного зміцнення і розроблена універсальна діаграма зміцнення матеріалів (УДЗМ), використання якої дозволяє оцінити наявність резервів міцності у різних матеріалів і виявити ті з них, для яких необхідна оптимізація механічних характеристик металургійним або механічним способами.

Таблиця 2. Результати випробувань посудин при циклічному навантаженні внутрішнім тиском

Матеріал	Тип концентратора напруг	T, К	P, МПа	$\sigma_{\text{НОМ}}$ (по нетто-перетізу)	$\frac{\sigma_{\text{НОМ}}}{[\sigma]^*}$	N циклів до руйнування	$\frac{N}{N^{2,93}}$
12Х18Н10Т	Поверхневі надрізи r=3; 5 мм	293	15	383	2,2	563	} 7,5
	Глибина надрізу 0,5t; l= 120 мм						
	Те саме	77	15	383	2,0	4231	
	Поверхневий надріз r= 0,2 мм	293	15	383	2,2	190	} 1,7
Глибина надрізу 0,5t; l = 120 мм							
	Те саме	77	15	383	2,0	326	
1Х18Н9Т	Поверхневі надрізи r= 0,2 мм	293	15	632	2,7	1154	} 1,6
	Глибина надрізу 0,6t; l= 115 мм						
	То же	77	15	632	2,2	1836	
ВТ5-Ікт	Повторні підвари зварних швів	293	20	573	2,2	35	} 3,5
	Те саме	77	27	774	3,0	124	

4. Розроблені нові узагальнені енергетичні параметри, що характеризують здатність конструкційних матеріалів до деформаційного зміцнення при кімнатній та криогенних температурах, а також дозволяє врахувати резерв енергопоглинання матеріалів при різних температурах в залежності від використовуваних нормативних коефіцієнтів запасу міцності.

5. Використання єдиного енергетичного принципу визначення поправок до допустимих напружень при різних температурах на основі врахування резервів деформаційного і низькотемпературного зміцнення, а також тріщиностійкості матеріалів дозволяє створювати рівноміцні конструкції для роботи при кімнатній та криогенних температурах.

6. Створені оригінальні експериментальні установки: УНС-10; УНС-20; ЦДС-1 і пневмогідралічний криогенний стенд (ПГКС) та розроблені методики дослідження міцності, деформованості і довговічності напівсферичних посудин, крупномасштабних моделей і натурних посудин при статичному та циклічному навантаженні в автоматичному режимі внутрішнім тиском в умовах кімнатної та криогенних температур (крупномасштабних моделей посудин - до 77 К, елементів посудин - до 4,2 К).

Спосіб випробування посудин при низьких температурах і установка для випробування напівсферичних моделей посудин при температурах нижчих 77 К (УНС-20) захищені авторськими свідоцтвами.

7. Результати досліджень конструкційної міцності посудин при кімнатній та криогенних температурах використані при розробці галузевого стандарту ОСТ 26-04-2585-80 "Техніка криогенна і криогенновакуумна. Посудини і камери. Норми розрахунку на міцність, стійкість та довговічність зварних конструкцій".

8. Вперше одержаний великий обсяг експериментальних даних про міцність і довговічність крупномасштабних моделей і зварних посудин тиску (всього більше 50 виробів), виготовлених із матеріалів різних типів і класів міцності - хромонікелевих і хромомарганцевих сталей,  $\alpha$ - і  $(\alpha+\beta)$ -титанових сплавів, вперше встановлені фактичні запаси їх міцності при кімнатній та криогенних температурах з урахуванням впливу конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів у наближених до реальних умовах.

9. Одержані експериментальні результати підтвердили обґрунтованість застосування енергетичного методу визначення допустимих напружень в практиці розрахунків конструкцій на міцність.

Зміст роботи відображений в наступних публікаціях:

1. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах // Стрижало В.А., Филин Н.В., Куранов Б.А.,..., Чечин Э.В. и др. - Киев: Наук. думка, 1988. - 240 с.
2. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Методы определения эквивалентных и допускаемых напряжений при однократном статическом нагружении. МР-158-85/ Лебедев А.А., Ковальчук Б.И.,..., Чечин Э.В. - М.: ВНИИМАШ, 1985. - 44 с.
3. Новиков Н.В., Чечин Э.В. Экспериментальная оценка прочности элементов тонкостенных сосудов давления при глубоком охлаждении // Пробл. прочности. - 1973. - № 4. - С. 37-40.
4. Новиков Н.В., Чечин Э.В., Зарубин Л.И. Испытание внутренним давлением тонкостенных элементов сосудов при охлаждении до температуры ниже  $-200^{\circ}\text{C}$  // Пробл. прочности. - 1973. - № 12. - С. 103-106.
5. Влияние охлаждения (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ) на несущую способность тонкостенных полусферических элементов сосудов / Н.В.Новиков, Э.В.Чечин, К.А.Щенко, О.А.Кудрявцев, О.Г.Квасневский // Пробл.прочности, 1974. - № 1. - С. 52-56.
6. Исследование сопротивления разрушению элементов природных трубопроводов при низких температурах / Чечин Э.В., Кесьян П.Н., Потапов И.К. и др. // Актуальные вопросы сварки в криогенном машиностроении. - Киев: Наук.думка, 1979. - С. 133-138.
7. Чечин Э.В. К оценке возможности повышения допускаемых напряжений в сталях при низких температурах // Пробл. прочности. - 1979. - № 2. - С. 36-38.
8. Лебедев А.А., Чечин Э.В. К выбору допускаемых напряжений при расчете конструкций по критерию статической прочности // Пробл.прочности, 1980. - № 10. - С. 32-34.
9. Определение резервов прочности сосудов на сварных моделях при нормальной и низкой температурах // Э.В.Чечин, И.К.Потапов, П.Н.Кесьян и др. - Автомат. сварка, 1981. - № 1. - С. 27-30.
10. Чечин Э.В., Новиков Н.В., Щенко К.А. Прочность тонкостенных полусферических элементов сосудов из стали 03Х20Н16АГ6 при низких температурах // Автомат. сварка. - 1981. -

№ 6.- С. 1-3.

11. Чечин Э.В. Влияние конструктивно-технологических факторов на прочность и деформативность тонкостенных элементов сосудов в условиях низких температур// Космические исследования на Украине. Республик.межведомств.сборник. Киев: Наук. думка, 1981.- Вып. 15.- С. 14-23.

12. Чечин Э.В. Исследование прочности и деформативности тонкостенных элементов сосудов давления// Механические испытания конструкционных сплавов при криогенных температурах. Киев: Наук. думка, 1982.- С. 63-76.

13. Оценка несущей способности крупномасштабных моделей сосудов при их нагружении внутренним давлением/Н.В.Новиков, Э.В.Чечин, И.К.Потапов и др.// Механические испытания конструкционных сплавов при криогенных температурах. - Киев: Наук.думка, 1982.- С. 76-84.

14. Чечин Э.В. Использование деформационного и низкотемпературного упрочнения материалов с большим запасом энергопоглощения для повышения допускаемых напряжений// Прочность материалов и конструкций при низких температурах.- Киев: Наук. думка, 1984.- С. 249-258.

15. Расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сосуда высокого давления/ Стрижало В.А., Кучер Н.К., Чечин Э.В. и др.// Пробл. прочности.- 1984.- № 9.- С. 9-12.

16. Чечин Э.В., Кесьян П.Н., Потапов И.К. Экспериментальное определение возможности повышения допускаемых напряжений для сварных сосудов давления из упрочняющихся материалов// Прочность материалов и конструкций при низких температурах.- Киев: Наук. думка, 1984.- С. 259-263.

17. Чечин Э.В. Резервы снижения металлоемкости сварных сосудов, работающих при температурах 293 и 77 К// Автомат. сварка, 1985.- № 2.- С. 6-12.

18. Малоцикловая усталость сварных соединений в изделиях криогенной техники/ В.М.Муратов, Л.Н.Копысицкая, Э.В.Чечин, Г.К.Шаршуков// Автомат. сварка.- 1985.- № 11.- С. 12-16.

19. Чечин Э.В., Кесьян П.Н., Потапов И.К. О возможности повышения допускаемых напряжений при расчете на прочность сосудов

давления из пластичных материалов// Криогенные материалы и их сварка.- Киев: Наук. думка, 1986.- С. 239-242.

20. Муратов В.М., Копысицкая Л.Н., Чечин Э.В. К оценке малоциклового прочностии криогенного оборудования// Прочность материалов и конструкций при низких температурах.- Киев: Наук.думка, 1990.- С. 161-167.

21.Чечин Э.В. Систематизация конструкционных материалов по уровню деформационного упрочнения и разработка энергетического метода определения допускаемых напряжений и запасов прочностии. Сообщение 1 // Пробл. прочностии.- 1992.- N 2.- С. 48-53.

22. Чечин Э.В. Систематизация конструкционных материалов по уровню деформационного упрочнения и разработка энергетического метода определения допускаемых напряжений и запасов прочностии. Сообщение 2 // Пробл. прочностии.- 1992.- N 2.- С. 54-61.

23. Chechin E.V. Energy-based method for determination of stresses.- Part. 1 // Int. J. Pres. Ves. and Piping 62.(1995) - P. 87-93.

24. Chechin E.V. Energy-based method for determination of stresses.- Part. 11// Int. J. Pres. Ves. and Piping 62.(1995) - P. 94-101.

25. Чечин Э.В.Экономия пластичных материалов при переходе от силового метода определения допускаемых напряжений к энергетическому // Пробл. прочностии.- 1996.- N 3.- С. 52-62.

26. А.с. 423005 СССР . Установка для испытания материалов на двухосное растяжение в условиях низких температур / Чечин Э.В., Новиков Н.В., Митликин М.Д. Оpubл. в бвл. N 13, 1974.

27. А.с. 1364826 СССР Способ испытания сосудов на прочностии при низких температурах/ Чечин Э.В., Потапов И.К., Кесьян П.Н.// Бвл. N 1. Оpubл. 7.01.1988.

28. Пневмогидравлический стенд для испытаний сосудов внутренним давлением при низких температурах/ Новиков Н.В., Митликин М.Д., Музыка Н.Р., Чечин Э.В. и др.; АН УССР. Ин-т пробл. прочностии.- Препр.- Киев: 1980.- 48 с.

29. Влияние конструктивно-технологических факторов на прочностии сталей при криогенных температурах/ Н.В.Новиков, Э.В.Чечин, К.А.Щенко, О.А.Кудрявцев// Стали и сплавы криогенной техники: Тез. докл.-Киев: 1975.- С. 34-35.

30. Ресурс энергопоглощения - характеристика возможности повышения допускаемых напряжений при расчете криогенных сосудов// 11 Всесоюз. совещ."Актуальные проблемы сварки в криогенном

машиностроении". Тез. докл. Киев: ЛОП ИЭС им. Патона АН УССР.- 1979.- С. 19.

31. Чечин Э.В., Юрченко Б.И., Музыка Н.Р. Совершенствование экспериментальных методов оценки конструкционной прочности сосудов давления - один из путей создания надежного криогенного оборудования // 1 Республиканская конференция по повышению надежности и долговечности машин и сооружений. Тез. докл. Ч.1.- Киев: Наук. думка, 1982.- С. 114-115.

32. Чечин Э.В., Кесьян П.Н., Потапов И.К. К оценке влияния концентрации напряжений на несущую способность сварных сосудов давления в условиях нормальной и криогенных температур// 11 Всесоюз. симп. "Стали и сплавы криогенной техники". Тез. докл.- Харьков: Ротапринт ФТИНТ АН УССР.- 1983.- С. 78.

33. Чечин Э.В. Возможности снижения металлоемкости конструкций, скрытые в деформационном и низкотемпературном упрочнении металлов// 11 Всесоюз. симп. Прочность материалов и конструкций при сложном напряженном состоянии. Тез. докл. Ч. 11. Киев: ОНТИ ИПШ АН УССР.- 1984.- С. 68-69.

34. Чечин Э.В., Потапов И.К., Кесьян П.Н. Установка ЦДС-1 для циклического нагружения сосудов внутренним давлением при низких температурах// Там же. - С. 6-70.

35. Оценка долговечности сосудов из малоникелевых сталей при криогенных температурах/ Потапов И.К., Кесьян П.Н., Чечин Э.В., Заболоцкий И.А./ 111 Всесоюз. симп. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии". Тез. докл. Киев: ОНТИ АН УССР.- 1989.- С. 45-46.

36. Чечин Э.В., Кесьян П.Н., Потапов И.К. Резервы прочности сварных оболочечных конструкций при наличии концентраторов напряжений// 1V Всесоюз. семинар по сварке в ПО "Уралмаш" "Производство сварных конструкций и высокопрочных сталей" Тез. докл. Свердловск: Ротапринт УЗТМ. - 1989.- С. 39.

37. Чечин Э.В. Определение индетерминированных коэффициентов запаса прочности// 111 Всесоюз. конф. "Прочность материалов и конструкций при низких температурах". Тез. докл.- Киев: ОНТИ ИПШ АН УССР.- 1991.- С. 84-85.

38. <sup>Чечин Э.В.</sup> о систематизации конструкционных материалов, основанной на их деформационном упрочнении// 111 Всесоюз. конф. "Прочность материалов и конструкций при низких температурах". Тез. докл. Киев: ОНТИ ИПШ АН УССР. - 1991.- С. 85-86.

Чечин Э.В. Разработка энергетического метода определения допускаемых напряжений, обеспечивающего снижение металлоемкости конструкций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 - механика деформируемого твердого тела. Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, 1997.

Защищается 50 научных работ, 2 авторских свидетельства, которые содержат теоретические и методические разработки, а также экспериментальное обоснование концептуально нового энергетического метода определения допускаемых напряжений и правомерности применения его в практике расчетов на прочность взамен традиционного силового, представляющего собой частный случай энергетического. Показано, что энергетический метод, благодаря аналитически разработанному механизму количественного учета основных механических характеристик материалов и преобразования их из качественных в расчетные, обеспечивает возможность дифференцированного повышения значений допускаемых напряжений для конструкционных сталей и сплавов различных классов прочности в пределах до 30 % при комнатной и до 50 % при криогенных температурах. Реализация этого метода позволяет сократить расход пластичных, упрочняющихся и хладостойких материалов за счет повышения их допускаемых напряжений на основе принципа: "выше качество - меньше расход" и, следовательно, радикально снизить металлоемкость и стоимость изготавливаемых конструкций без уменьшения уровня их надежности. Правомерность применения энергетического метода подтверждена результатами испытаний сварных сосудов из различных материалов при статическом и циклическом нагружениях внутренним давлением в условиях комнатной и криогенных температур.

Chechin E.V. The Development of the Energy-Based Method for Determining Allowable Stresses Which Provides a Reduction of Metal Consumption in Engineering Structures. The thesis for a doctor's degree in speciality 05.02.07, the mechanics of a deformable solid. Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997

50 scientific works, 2 author's certificates are being defended which contain theoretical and methodological developments, and also the experimental substantiation of a conceptually new energy-based method for determining allowable stresses and the validity of its application of the practice of strength analysis instead of the conventional stress-based method being a particular case of the energy-based one. By the analytically developed mechanism for a quantitative consideration of the material main mechanical characteristics and their transformation from qualitative to calculated ones, the energy-based method is shown to make possible differentiated increasing of the allowable stress values for structural steels and alloys of different classes of strength in the range to 30% at room and to 50% at cryogenic temperatures. The implementation of this method makes it possible to reduce consumption of plastic, hardening and cold-resistant materials at the cost of an increase in their allowable stresses under the principle "the higher the quality, the lower the consumption" and therefore, to reduce drastically the metal consumption and the cost of produced structures without lowering the level of their reliability. The validity of the energy-based method is supported by the test results for welded pressure vessels of different materials under static and cyclic loading by internal pressure under conditions of room and cryogenic temperatures.

**Ключові слова:**

допустимі напруження, розрахунок на міцність, конструкційні матеріали, енергетичні параметри, деформаційне та низьктемпературне зміцнення, посудини тиску, металоємкість конструкцій.

Підп.до др. 9.01.97. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. др. Умов. др. арк. 1,86. Умовн. кр.-відб. 1,98.  
Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Замовл. 6.

---

Дільниця ротопринтного друкування ВНТІ ІПМіц. НАНУ  
252014, Київ-14, вул. Тимірязевська, 2

435399

AB 37.057