

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Деньщиков Олександр Юрійович



УДК 620.178.5

**ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків і Донбаській державній машинобудівній академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Морачковський Олег Костянтинівич,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри теоретичної механіки

доктор технічних наук, професор
Хромов Володимир Гаврилович,
Севастопольський національний технічний університет, м. Севастополь,
завідувач кафедри технічної механіки і машинознавства

Захист відбудеться "16" березня 2011 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий "10" лютого 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10



В. Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Від рівня залишкових напружень значною мірою залежать точність геометричної форми й розмірів готової продукції, конструкційна міцність і довговічність елементів машин при експлуатації. Для зниження рівня залишкових напружень у машинобудуванні найчастіше використовуються традиційні технологічні процеси: низькотемпературний відпал і природне старіння. При цьому методи вібраційної обробки з метою зниження залишкових напружень (вібраційного старіння) у порівнянні з термічним методом застосовуються вкрай рідко. Між тим досвід із впровадження вібраційної обробки з метою зниження залишкових напружень на ряді підприємств свідчить про поліпшення умов праці й суттєве зменшення забруднення навколишнього середовища, зниження витрат енергоресурсів більш ніж у 500 разів і скорочення технологічного циклу виробництва в 50–60 разів. Однією з основних причин низького рівня впровадження у виробництво методу вібраційного старіння є відсутність надійних розрахункових методів для вибору раціональних параметрів вібраційної обробки для релаксації залишкових напружень у процесі вібраційної обробки виробів. Залишаються невизначеними умови закріплення, точка прикладання та величина збурюючої сили, час обробки виробів. На теперішній час ці питання вирішуються на підставі експериментальних досліджень, що залежить від особистого досвіду експериментатора, при помилках якого обробка виявляється недостатньо ефективною та часто призводить до негативного результату (утворення тріщин, руйнування конструкцій).

У зв'язку з вищезазначеним розробка надійних розрахункових методів для визначення величин залишкових напружень після проведення віброобробки за відомими полями залишкових і вібраційних напружень є актуальною та практично важливою науково-практичною задачею, яка підвищить техніко-економічні показники процесу вібраційного старіння та ефективність технологій і устаткування для вібраційної обробки, і визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано за держбюджетними темами Міністерства освіти і науки України кафедри технічної механіки Донбаської державної машинобудівної академії: «Математичне моделювання динаміки і міцності машин і механізмів» (номер держ. реєстрації 0100U003271), «Математичне моделювання кінематики, динаміки і міцності механічних систем з використанням сучасних пакетів прикладних програм для загальних інженерних розрахунків» (номер держ. реєстрації 0103U007602); і кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: «Математичне моделювання і розробка методів чисельного аналізу процесів нелінійного деформування та руйнування складних механічних систем» (номер держ. реєстрації 0103U001497), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності технології зниження залишкових напружень в елементах машинобудівних конструкцій методом вібраційної обробки шляхом побудови розрахункової моделі процесу старіння.

Для реалізації мети роботи поставлені такі завдання:

- створити реологічну модель і феноменологічні рівняння стану для моделювання процесів вібраційного старіння матеріалів, які на підставі експериментальних даних і механічних аналогій і фундаментальних положень теорії пружно-пластичного деформування були б придатними для практичних розрахунків залишкових напружень при вібраційній обробці виробів;

- запропонувати методи визначення коефіцієнтів феноменологічних рівнянь стану матеріалу, в якому відбувається процес вібраційного старіння за експериментальними даними базових випробувань для отримання кривих релаксації та їх апроксимації;

- виконати аналіз процесу релаксації залишкових напружень в умовах вібраційної обробки вісесиметричних тіл обертання й стрижневих конструкцій;

- обґрунтувати вірогідність результатів, отриманих на основі запропонованого розрахункового методу оцінювання величини залишкових напружень після процесу вібраційного старіння, шляхом порівняння з експериментальними даними;

- проаналізувати результати розрахунків залишкових напружень у реальних елементах машинобудівних конструкцій: опори склепіння доменної печі й зварних балок таврового та двотаврового поперечних перерізів, надати рекомендації по раціональному вибору параметрів вібраційної обробки даних конструкцій з метою зменшення залишкових напружень.

Об'єкт дослідження: процеси впливу вібраційної обробки на поля залишкових напружень і вимушені коливання предметів дослідження.

Предмет дослідження: вісесиметричні деталі машин і стрижневі елементи машинобудівних конструкцій, зокрема: опори склепіння доменної печі та зварні балки таврового й двотаврового поперечних перерізів.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційного дослідження були використані методи прикладної теорії пружно-пластичного деформування для визначення величин залишкових напружень і розрахунок пластичного зрушення за цикл релаксації, прикладної теорії коливань і механіки суцільних середовищ для визначення амплітудних значень динамічних напружень. Поля напружень в елементах машинобудівних конструкцій визначались двома способами: на підставі методів експериментальної механіки (методів тензометрії, вимірювання магнітної індукції) та чисельними методами, включаючи метод скінченних елементів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- нові феноменологічні рівняння стану для моделювання процесів вібраційного старіння матеріалів, які з використанням експериментальних кривих релаксації є придатними для практичних розрахунків залишкових напружень при вібраційній обробці виробів;

- математичні постановки задач аналізу процесів релаксації залишкових напружень при відомих полях початкових залишкових напружень і динамічних напружень в умовах вібраційної обробки елементів машинобудівних конструкцій;

- адаптовано метод скінченних елементів для чисельного вирішення задачі релаксації залишкових напружень при віброобробці й розроблено програмне забезпечення;

- отримано нові закономірності розподілення залишкових напружень у реальних елементах машинобудівних конструкцій: опорі склепіння доменної печі, зварних балках типу тавр і двотавр; наведено рекомендації з раціонального вибору параметрів їх вібраційної обробки з метою зменшення залишкових напружень.

Практичне значення одержаних результатів для конструкторських відділів машинобудівних підприємств полягає у використанні запропонованого розрахунково-експериментального методу та програмного забезпечення для визначення залишкових напружень після вібраційного старіння. Сформульовано рекомендації щодо вдосконалення технологічних режимів, які можна використовувати в наукових і прикладних дослідженнях при розробці нових технологій і устаткування для вібраційної обробки виробів машинобудівної галузі.

Результати роботи у вигляді програмних продуктів, практичних рекомендацій і конкретних технічних рішень впроваджені на ЗАТ «Завод крупних електричних машин» (м. Нова Каховка).

Програмне забезпечення для розрахунку залишкових напружень після вібраційної обробки та методика розрахунку процесу вібраційної обробки були використані на ТОВ «Центр НТТМ "Імпульс"» (м. Краматорськ) під час випробувань на Донецькому металургійному заводі.

Розроблені програмні продукти з розрахунку величин залишкових напружень після зварювання та вібраційної обробки, розрахункові модулі з рішення систем рівнянь методу скінченних елементів і визначення величин напружень за відомими значеннями вузлових переміщень використовуються в навчальному процесі на кафедрі технічної механіки Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ) у межах викладання дисципліни «Розрахунок і автоматизоване проектування оптимальних конструкцій» і при виконанні курсових, дипломних і випускних робіт студентів і магістрів ДДМА.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, планування й участь у проведенні експериментів, аналіз і узагальнення результатів теоретичних, а також експериментальних досліджень, розробка практичних рекомендацій і участь у впровадженні їх в промислове виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2003 р., 2004 р., 2005 р.), «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Вінниця, 2004 р., м. Полтава, 2005 р.), «Важке машинобудування. Проблеми і перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2005 р.), науково-технічна конференція професорський-викладацького складу, наукових, інженерно-технічних працівників, аспірантів і студентів Донбаської державної машинобудівної академії

за наслідками наукової діяльності академії в період 2004–2005 рр. (м. Краматорськ, 2005 р).

Публікації. Основний зміст роботи опублікований у 10 наукових працях, з них 8 у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 143 сторінки, 58 рисунків по тексту, 5 рисунків на 5 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 3 додатки на 3 сторінках, 196 найменувань використаних літературних джерел на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну значимість досліджень за темою дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами, інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У першому розділі подано аналіз основних публікацій за темою роботи та на цій підставі з'ясовано джерела виникнення й умови для стабілізації залишкових напружень, визначено закономірності поведінки матеріалів деталей машин та елементів конструкцій, що піддаються вібраційному старінню.

Розробку й впровадження методів вібраційного старіння в першу чергу пов'язують із роботами Д. К. Чорнова, R. A. Claxton, A. Rappen, G. P. Wozney, G. R. Crawler, L. E. Thompson. У цьому напрямі відзначаються роботи О. Ю. Коцюбинського, Г. Г. Адояна, А. М. Герчикова, Е. Ч. Гині, К. М. Рагульськіса, В. М. Сагалевича. Дослідження, проведені цими авторами, включають різні випробування: від експериментів на простих зразках із залишковим напруженням, викликаним зміцнювальною обробкою або пластичною деформацією згину, до випробувань на литих і зварних виробах.

Вивчено джерела виникнення залишкових напружень при виготовленні металевих виробів під впливом різних технологічних операцій, що викликають структурні зміни в металі під впливом температури, після зварювання, пластичної деформації, механічної обробки. На підставі проведеного аналізу зроблено висновок, що ні конструктивними, ні технологічними прийомами неможливо повністю усунути чинники виникнення залишкових напружень, проте сучасний рівень технології виробництва дозволяє вибрати раціональний процес виготовлення, який мінімізує вплив цих чинників.

Досліджено різні способи зменшення залишкових напружень і виконано аналіз факторів, які надають перевагу вібраційному старінню перед іншими методами. Наведено основні завдання, що вирішуються за допомогою вібраційного старіння.

Розглянуто наведені в літературі дані експериментальних досліджень вібраційного старіння, що свідчать про нелінійність залежності швидкості процесу релаксації від величин залишкових і динамічних напружень. Як зазначено, швидкість процесу зміни залишкових напружень пропорційна сумі

величини залишкових напружень і амплітуди діючих напружень. На основі аналізу наявних публікацій доведено, що для зварних з'єднань (стикових, кутових, напускних) оптимальна тривалість і рівень вібраційних навантажень не впливають на міцність з'єднань, а тимчасовий опір і границя текучості навіть дещо підвищуються, при цьому границя витривалості не знижується.

На основі відомостей про кристалічну структуру металів і теоретичні уявлення про механізм вібраційного старіння зроблено висновок про те, що процес пластичної деформації можна розглядати як послідовність рівноважних станів, за якими пластична деформація накопичується стрибками. Проаналізовано відомі реологічні моделі, що описують механізм вібраційного старіння.

Розглянуто методи визначення залишкових напружень після зварювання. Ці методи застосовують для визначення остаточного розподілення залишкових напружень у зварюваних тілах при розрахунках процесу їхньої релаксації.

Другий розділ пов'язаний із розробкою механічної моделі й феноменологічних рівнянь стану вібраційної релаксації напружень у металах.

Механічна модель представлена на рис. 1, де C_1, C_2, C_3 – коефіцієнти жорсткості пружних елементів [Н/м]; η – коефіцієнт в'язкості $\left[\frac{H \cdot c}{m}\right]$, $F_{тр}$ – сила тертя ковзання кулонівського елемента [Н]; $\Delta_{нач}$ – початковий зсув кулонівського елемента щодо положення рівноваги [м]; A – амплітуда коливань кінематичного збудження [м]; ω – кругова частота коливань кінематичного збудження [1/с].

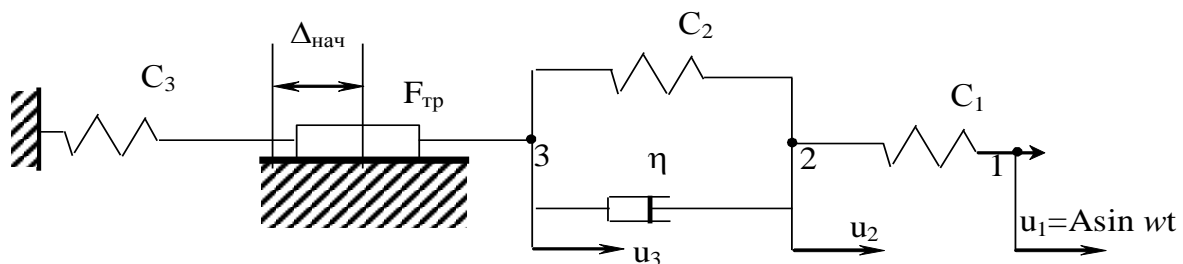


Рис. 1. Механічна модель полікристалічного металу.

Розглянуто рівняння руху запропонованої моделі при гармонійному збудженні та надані розв'язки рівнянь руху механічної моделі для основних режимів: зчеплення, зростання залишкових напружень, релаксації залишкових напружень. На підставі аналізу цих розв'язків надано обґрунтування вибору механічної моделі для опису процесів віброрелаксації залишкових напружень у металах.

Визначені умови виникнення режимів зростання та релаксації залишкових напружень. Ці умови полягають у тому, що сума проєкцій сили пружності й внутрішньої сили від дії кінематичного збудження повинна бути не меншою від сили тертя. Знайдені умови, за яких спостерігатиметься тільки режим релаксації залишкових напружень, а умова виникнення режиму зростання залишкових напружень виконуватися не буде. Визначені умови, за яких поведінка

одержаної механічної моделі відповідає поведінці ефективного середовища, що відображає якісну поведінку матеріалу, в якому відбувається процес вібраційного старіння.

Здійснено параметричний аналіз поведінки механічної моделі, на підставі якого встановлено вплив різних параметрів запропонованої моделі на швидкість протікання процесу релаксації.

На основі чисельного розв'язання рівнянь руху проведено аналіз поведінки моделі за умов релаксації залишкових напружень, при цьому встановлено:

- швидкість релаксації пропорційна сумі величини залишкових напружень і амплітуди діючих напружень у розглянутий момент часу;
- рух відбувається за умови рівності суми проекцій сили пружності й внутрішньої сили від дії кінематичного збудження силі тертя;
- для випадків, коли дана умова рівності суми проекцій не виконується, зрушення немає, і в моделі відбуваються пружні коливання;
- напруження зменшуються до певного рівня, при якому величина сил зовнішньої дії не перевищує критичної сили; поновлення зовнішньої сили в цьому ж напрямі продовжить процес релаксації;
- при певній величині критичної сили зрушення відбуваються в обох напрямках.

На підставі виконаного аналізу руху механічної моделі в режимі релаксації запропоновано феноменологічне рівняння вібраційної релаксації залишкових напружень у металевих матеріалах у вигляді кінетичного рівняння, що для одномірного випадку має вигляд:

$$\dot{\varepsilon}^p = C e^{\left(a \frac{(|\tilde{\sigma}| + |\sigma_a|)}{\sigma_{-1}} \right)} \tilde{\sigma}, \quad (1)$$

де $\dot{\varepsilon}^p$ – швидкість пластичного зрушення за цикл релаксації; $\tilde{\sigma}, \sigma_a$ – залишкові напруження та створювані джерелом вібрації амплітудні значення динамічних напружень [Па]; C [Па⁻¹], a – константи, які визначаються з експериментальних кривих релаксації матеріалу; σ_{-1} – границя втоми матеріалу [Па].

Запропоновані методи визначення коефіцієнтів C та a феноменологічних рівнянь стану за експериментальними даними базових випробувань для отримання кривих релаксації та їхньої апроксимації методом найменших квадратів.

Здійснено узагальнення феноменологічного рівняння вібраційної релаксації залишкових напружень у металевих матеріалах (1) для випадку складного напруженого стану. На основі припущень, що при релаксації в умовах складного напруженого стану компоненти девіатора тензора швидкостей пластичного зрушення за цикл релаксації $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ є пропорційними компонентам девіатора тензора залишкових напружень \tilde{S}_{ij} , а коефіцієнт пропорційності залежить від другого інваріанта тензора суми залишкових $\tilde{\sigma}$ та створюваних джерелом вібрації

амплітудних динамічних напружень σ_a , феноменологічні рівняння вібраційної релаксації залишкових напружень для випадку складного напруженого стану набувають вигляду:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} C e^{\left(\frac{a \sqrt{3J_2(\tilde{\sigma} + \sigma_a)}}{\sigma_{-1}} \right)} \tilde{S}_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2)$$

де $\sqrt{3J_2(\tilde{\sigma} + \sigma_a)}$ – інтенсивність напружень за Мізесом.

Третій розділ присвячено методам розрахунку релаксації залишкових напружень у стрижневих і вісесиметричних елементах машинобудівних конструкцій.

Розглянуто пружно-пластичні деформації та наведені розрахунки вібраційної релаксації стрижнів при розтягуванні – стисканні. При цьому величини пластичного зрушення за цикл релаксації визначались за допомогою (1).

Досліджено вплив процесу вібраційного старіння на напруження в балці прямокутного перерізу висотою 40 мм. Залишкові напруження створені згинанням балки в умовах чистого згину за границю текучості таким чином, щоб зона пластичності зайняла половину висоти перерізу. Амплітуда діючих напружень дорівнювала $0,25\sigma_t$. Навантаження прикладалося таким чином, щоб напружений стан відповідав умовам чистого згину. Визначено величини залишкових напружень до і під час вібраційної обробки. Отримані дані наведено на рис. 2.

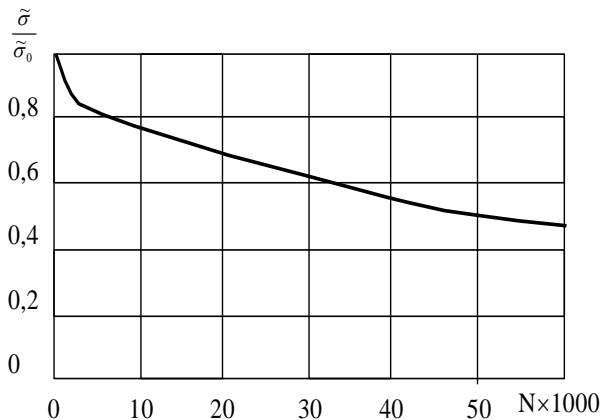


Рис. 2. Зміна величин залишкових напружень при $y = h/2$.

Аналіз розрахункових даних свідчить про те, що швидкість релаксації залишкових напружень тим вища, чим вищий їхній рівень.

Розв'язано задачі пружно-пластичного деформування труб під тиском і задачі віброрелаксації залишкових напружень у трубах при дії вібрації від осьової сили. Зроблено розрахунок процесу вібраційної обробки для прикладу, наведеного в літературі. Залишкові напруження створені внутрішнім тиском. При цьому передбачаються такі розміри труби: внутрішній радіус 67 мм, зовнішній – 187 мм, радіус, по якому проходить границя зони пластичної

течії, $r_T = 127$ мм. Діаграма розтягу матеріалу була схематизована у вигляді діаграми з лінійним зміцненням, без границі текучості. Основні параметри її: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $E_T = 6850$ МПа, $\sigma_T = 476$ МПа.

Збудження коливань відбувається за рахунок поздовжнього навантаження з амплітудним значенням динамічних напружень $\sigma_a = 0,25 \sigma_T$.

Отримані графіки розподілу залишкових напружень до релаксації і через кожних 5×10^3 циклів коливань під час віброобробки наведено на рис. 3.

Як можна побачити, зменшення окружних напружень супроводжується збільшенням радіальних і в деяких зонах поздовжніх напружень. Встановлено, що в процесі релаксації величини залишкових напружень у точках труби наближаються до значення сферової складової тензора напружень, що пояснюється пропорційністю змін пластичного зрушення за цикл релаксації компонентам девіатора тензора залишкових напружень. Отже, у точках труби, де компоненти девіатора залишкових напружень дорівнюють нулю, пластичні зрушення не відбуваються і релаксація напружень відбувається за рахунок перерозподілу напружень у суміжних зонах.

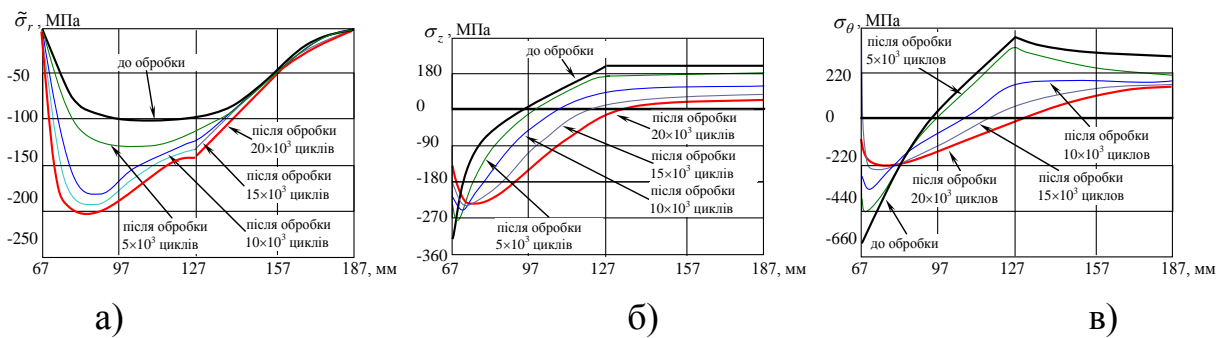


Рис. 3. Залишкові напруження:
а – радіальні; б – поздовжні; в – окружні.

Аналогічно розглянуті задачі пружно-пластичного деформування та віброрелаксації залишкових напружень для суцільної круглої пластини постійної товщини при зонтичних формах коливань. Наведено розрахункові дані залишкових напружень до і після релаксації.

Створено алгоритм і розроблено комплекс програмних засобів для розв'язування задач віброрелаксації залишкових напружень у конструкціях із застосуванням методу скінченних елементів. Побудова скінченноелементної моделі здійснено в САЕ-пакеті COSMOS/M; розрахунок матриці жорсткості, розв'язання системи рівнянь методу скінченних елементів, визначення величини діючих напружень виконано в розробленому програмному комплексі. Виконано порівняння результатів розрахунку задач про релаксацію залишкових напружень при чистому згині прямих стрижнів із використанням методу скінченних елементів і за допомогою аналітичних залежностей (вважалося, що форма стрижня та напружений стан в обох випадках аналогічні). Отримані в обох випадках результати не відрізняються більш ніж на 5 %, що дозволяє вважати розрахунки із застосуванням методу скінченних елементів достовірними.

Виконані розв'язання прикладних задач вібраційної обробки конструктивних елементів машин наводяться в **розділі 4**.

Розглянуті зварні балки таврового й двотаврового поперечного перерізу, зварені з листового прокату, для яких розраховані залишкові напруження після зварювання й віброобробки.

Виконано вибір раціональних параметрів вібраційного старіння для зварної конструкції, яка використовується в ливарному виробництві, – опори склепіння доменної печі (рис. 4).

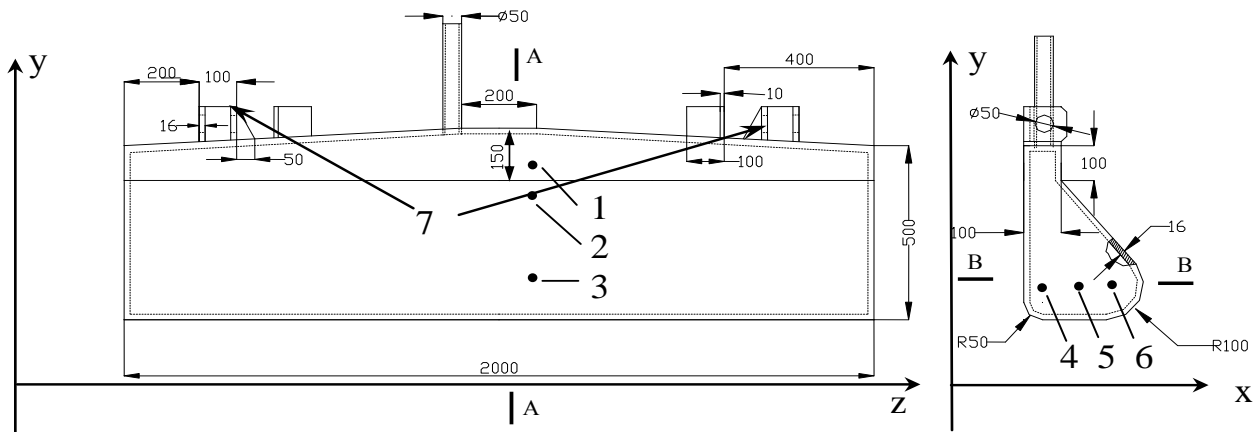


Рис. 4. Креслення балки:

1-6 – контрольні точки (місця кріплення тензодатчиків під час експерименту);
7 – провусини.

Для цього створена скінченноелементна модель балки в САЕ-пакеті COSMOS/M. Було розраховано поле діючих динамічних напружень як напруження при змушених коливаннях. Амплітуда збурюючої сили дорівнювала 30 кН. Розрахунок проводився для частот, що дорівнюють першим трьом власним частотам конструкції. За допомогою розробленого програмного комплексу було розраховано залишкові напруження після зварювання.

Як критерій якості вибору раціональних параметрів процесу вібраційного старіння використана величина залишкових напружень у серединному перерізі балки. Розглянуті вплив порядку розташування частот, на яких проводилася віброобробка, умов закріплення й місця положення вібратора.

На рис. 5. представлені одержані епюри залишкових напружень (епюри відповідають залишковим напруженням на опуклій поверхні), де суцільна лінія – епюри до релаксації, штрихова та штрихпунктирна лінії – після релаксації на перших трьох резонансних частотах, коли частоти розташовані в порядку збільшення та зменшення відповідно.

Як видно з одержаних епюр, при віброобробці найбільше зниження залишкових напружень спостерігається в перерізі, де була найбільша амплітуда діючих напружень на першій із оброблюваних частот.

Як показав аналіз, найбільш раціональною є схема закріплення з розташуванням опор по краях, вібратора – максимально близько до центра ваги конструкції.

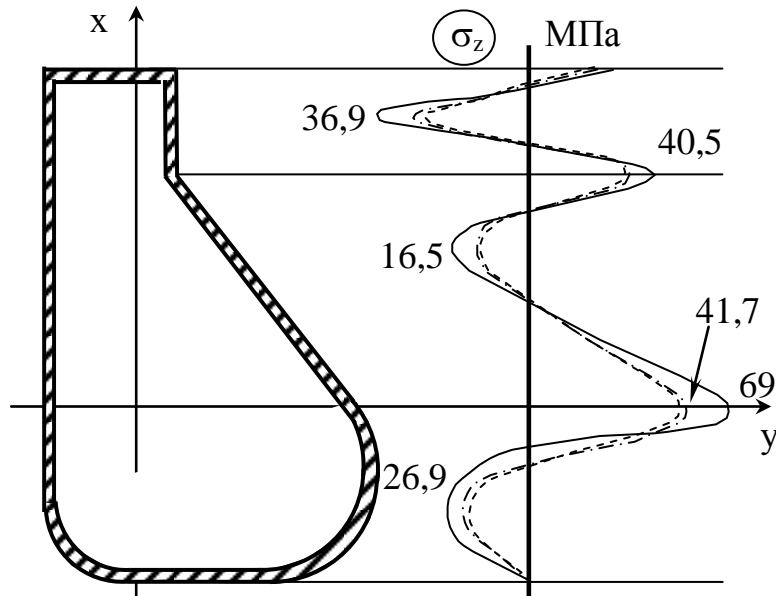


Рис. 5. Епюри розрахованих залишкових напружень у перерізі А–А.

У **розділі 5** наведено результати виконаних у роботі експериментальних досліджень з визначення величин залишкових напружень після процесу вібраційного старіння.

Досліджено релаксацію залишкових напружень у сталевій балці прямокутного перерізу при чистому згині під час вібраційної обробки. Експериментальні зразки балки спочатку були піддані пружно-пластичному згину статично прикладеними парами сил. Величина сил добиралася таким чином, щоб зона пластичної деформації дорівнювала половині висоти перерізу. Віброобробка проводилась збудженням поперечних коливань на першій власній частоті. Вимірювання проводилися за допомогою тензодатчиків 2ПКП-30-200ГБ (опір 199 Ом, активна база 30 мм, коефіцієнт тензочутливості для напружень $S = 2,09$), підключених по незбалансованій мостовій схемі, симетричній щодо живильної діагоналі. Зміна електричного опору тензорезисторів визначалася вимірником деформації ІДЦ-1. Використовувалось чотири тензодатчика: два на верхній поверхні балки, два на нижній, на відстані $1/3$ від кожної з опор. Результати вимірювань представлені на рис. 6 у вигляді кривих релаксації – залежності напружень від кількості циклів коливань під час вібраційного старіння (напруження взяті за модулем). Час закінчення віброобробки визначався за моментом стабілізації зміни залишкових напружень: як можна побачити з графіка на рис. 4, після 10^4 циклів не спостерігається зменшення напружень.

Одержані дані кривих релаксації (рис. 6) після їхньої апроксимації методом найменших квадратів були використані для визначення коефіцієнтів феноменологічного рівняння (2), що дозволило визначити $C = 7,79 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $a = 5,57$.

Побудовані епюри залишкових напружень до та після процесу вібраційної обробки зварних балок таврового та двотаврового поперечного перерізів за даними обробки експериментально визначених коефіцієнтів магнітної проникності. Експерименти виконувалися в Науково дослідному інституті проблем важкого машинобудування (м. Краматорськ).

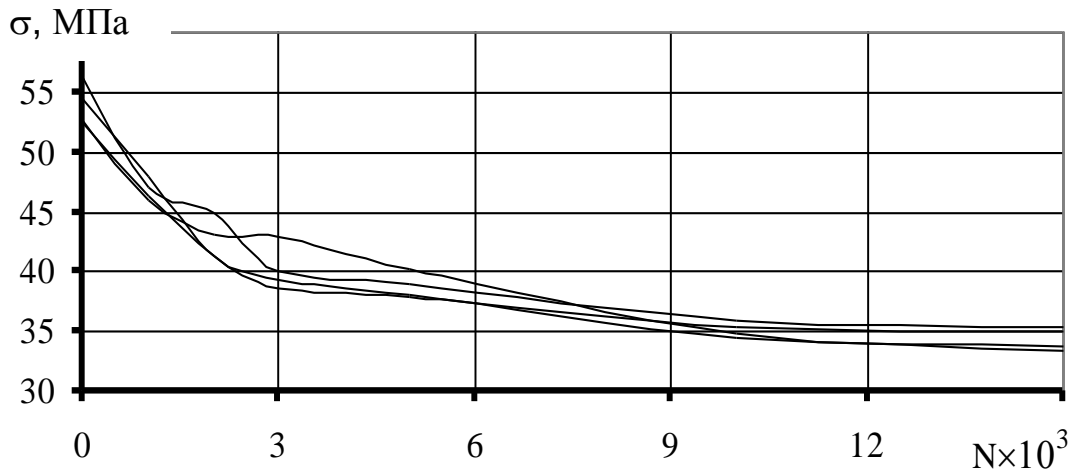


Рис. 6. Експериментальні криві релаксації.

Експериментальні зразки балок зварювалися з листового прокату з габаритними розмірами $100 \times 140 \times 1000$ мм для таврових балок і $200 \times 200 \times 1000$ мм для двотаврових. Матеріал – сталь Ст. 3 для таврових балок, сталь 10ХСНД для двотаврових. Товщина листів полиць і стінок обох типів балок складала 8 мм. Напруження вимірювалося магнітопружним методом на полицях балок приладом ІОН-4М. Вимірювання проводилися на верхніх полицях балок у поперечному перерізі, розташованому посередині балки, у 10 точках розподілених рівномірно вздовж вісі x .

Порівняння розрахункових і експериментальних даних для напружень наведено на рис. 7 і 8.

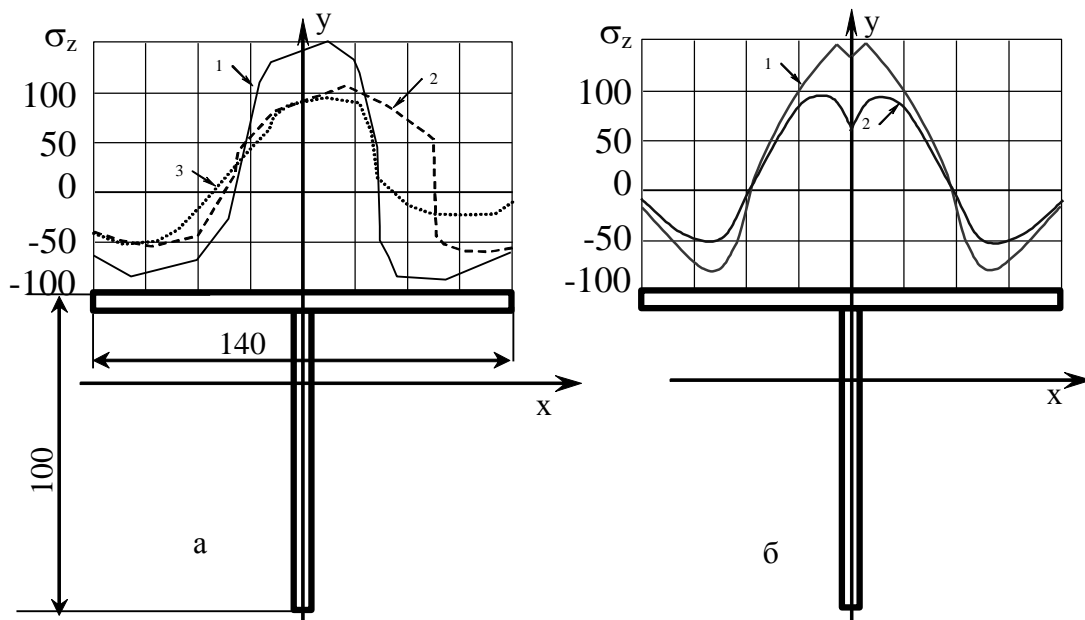


Рис. 7. Поперечний переріз таврової балки й епюри залишкових напружень σ_z :
 а – одержані експериментально; б – розрахункові;
 1 – після зварювання; 2 – після вібраційної обробки (20 000 циклів);
 3 – після термообробки.

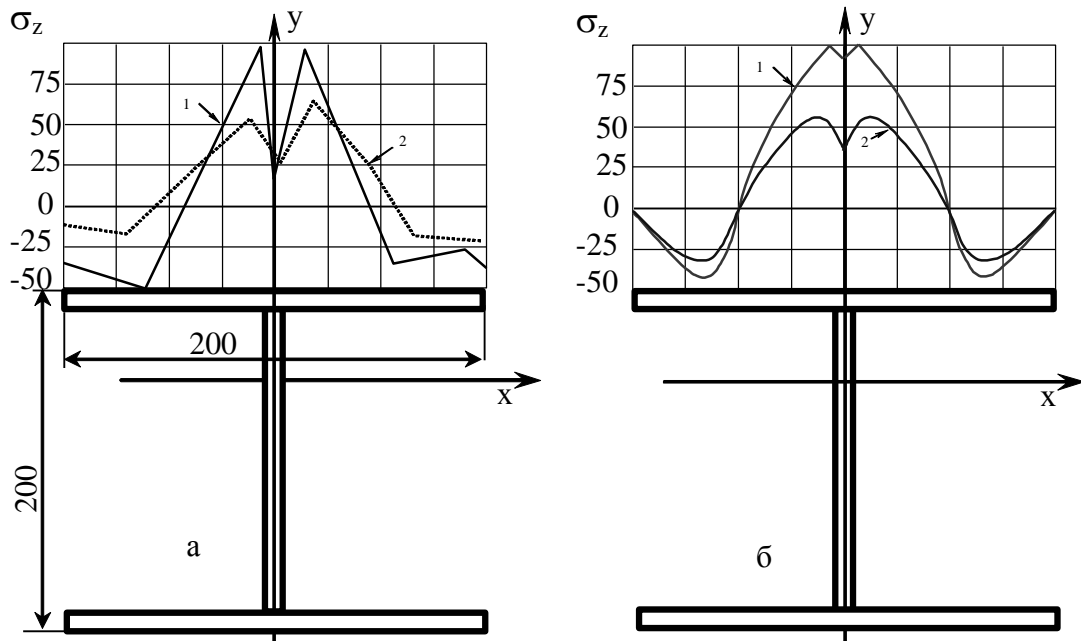


Рис. 8. Епюри залишкових напружень у двотавровій балці:
 а – одержані експериментально; б – розрахункові;
 1 – після зварювання; 2 – після вібраційної обробки (20 000 циклів).

Розбіжність для максимальних значень не перевищує 6 %, що знаходиться в межі, припустимій для інженерних розрахунків. Як видно з рис. 7, а, експериментально не зафіксоване різке зниження напружень поблизу точки, де $x = 0$. Відмінності пояснені тим, що дані вимірювання залишкових напружень є усереднені в межах площі контакту поверхні датчика.

Наведено опис експериментальних досліджень, які були виконані здобувачем на Донецькому металургійному заводі (цех металоконструкцій), та одержані експериментальні дані з релаксації залишкових напружень опори доменної печі, загальний вигляд якої наведено на рис. 9.

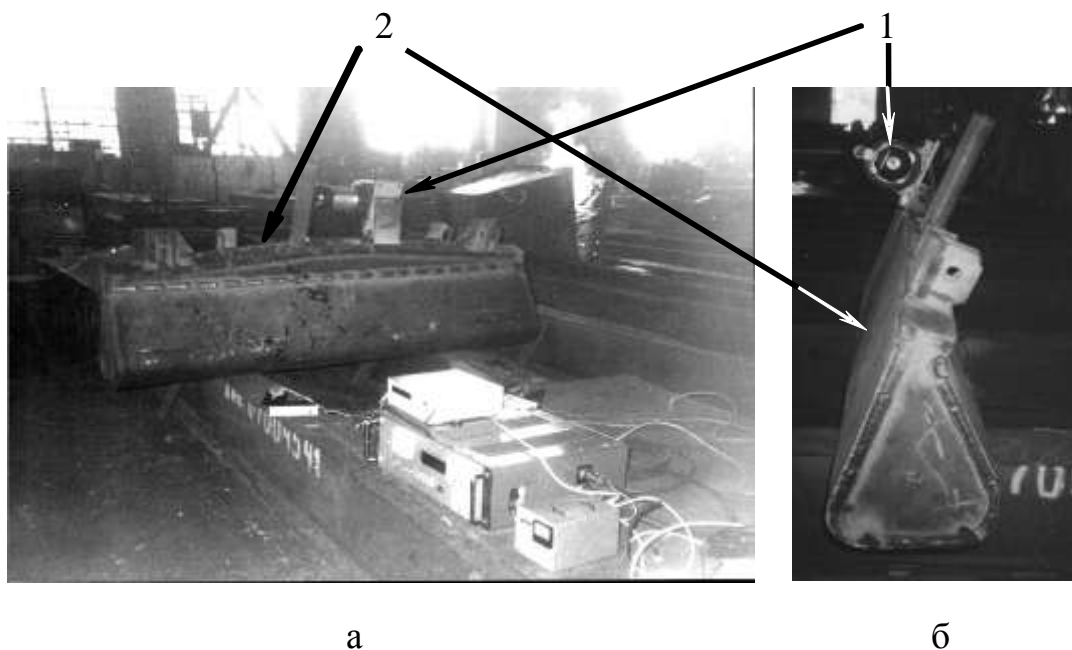


Рис. 9. Закріплення вібратора 1 на оброблюваній конструкції 2.

Для проведення віброобробки конструкція балки була змінена, а саме підварено кронштейн для кріплення вібратора, який було відокремлено після віброобробки (рис. 10).



Рис. 10. Закріплення оброблюваної конструкції підвішуванням тросами за допомогою крана-балки.

Вимірювання проводилися за допомогою вимірювача деформації ИДЦ-1 і тензодатчиків 2ПКП-30-200ГБ, місця розташування яких показано на рис. 4.

З метою ізолювання від дії зовнішніх чинників конструкція підвішувалася за провусини на тросах (рис. 10).

Віброобробка проводилася резонансним методом за допомогою віброкомплекса ВК 93-МЗ.

Результати експерименту, наведені у вигляді таблиці 1, показують зниження залишкових напружень; підтверджуються дані результати і за непрямою ознакою – зниженням споживаного струму двигуна.

Таблиця 1

Зміна залишкових напружень

Зміна величини залишкових напружень	№ датчика					
	1	2	3	4	5	6
Розрахункова, МПа	19,8	6,9	27,3	9	81	21
Експериментальна, МПа	22	10	28	8	80	22

Розбіжність між отриманими експериментально й розрахованими теоретично максимальними значеннями зміни залишкових напружень не перевищує 6 %, що знаходиться в межах допустимої похибки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано науково-практичну задачу оцінювання зміни рівня залишкових напружень в елементах машинобудівних конструкцій при вібраційній обробці. Основні теоретичні й практичні результати проведеного дослідження полягають у такому:

1. Створено реологічну модель і феноменологічні рівняння стану для моделювання процесів вібраційного старіння матеріалів, які є придатними для практичних розрахунків залишкових напружень при вібраційній обробці конструкцій. Запропоноване феноменологічне рівняння базується на експериментальних даних, механічних аналогіях і фундаментальних положеннях теорії пластичності.

2. Запропоновано методи визначення коефіцієнтів феноменологічних рівнянь стану матеріалу, в якому відбувається процес вібраційного старіння за експериментальними даними базових випробувань. Отримано криві релаксації та проведено їх апроксимацію методом найменших квадратів, що дало змогу визначити коефіцієнти феноменологічної залежності;

3. На підставі запропонованих рівнянь стану сформульовано математичні постановки задач аналізу релаксації залишкових напружень при вібраційній обробці елементів машинобудівних конструкцій.

4. Адаптовано метод скінчених елементів для чисельного розв'язання задач аналізу процесів релаксації залишкових напружень в елементах конструкцій при віброобробці.

5. Проведений в промислово-лабораторних умовах комплекс експериментальних досліджень дозволив отримати статистичну інформацію про діапазони варіації вхідних параметрів, які найістотніше впливають на протікання процесу вібраційного старіння. Виконано теоретичні й експериментальні дослідження перевірки достовірності результатів, на підставі яких доведено можливість використання розробленого методу для розрахунку реальних об'єктів.

6. За даними аналізу розрахунків залишкових напружень реальних елементів машинобудівних конструкцій (опора зведення доменної печі й зварні балки таврового й двотаврового поперечних перерізів) отримано рекомендації щодо раціонального вибору параметрів вібраційної обробки з метою зменшення залишкових напружень для даних конструкцій.

7. Результати дисертаційної роботи (методика розрахунку процесу вібраційного старіння машинобудівних конструкцій; технологічні й конструктивні рекомендації щодо вдосконалення технології та устаткування вібраційного старіння) були впроваджені на ЗАТ «Завод крупних електричних машин» (м. Нова Каховка), використані на ТОВ «Центр НТТМ "Імпульс"» при проведенні випробувань віброкомплексів на Донецькому металургійному заводі; використовуються в навчальному процесі кафедри «Технічна механіка» Донбаської державної машинобудівної академії в рамках викладання спецкурсу «Розрахунок і автоматичне проектування оптимальних конструкцій».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Деньщиков А. Ю. Моделирование процесса снижения остаточных напряжений посредством вибрационной обработки (одноосные задачи) / А. Ю. Деньщиков, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – № 8, Т. 2. – С. 55–60.

Здобувачеві належить розробка математичної моделі і програмних засобів для її реалізації, реалізація та аналіз отриманих результатів.

2. Деньщиков А. Ю. Разработка методики расчета процесса снижения остаточных напряжений посредством вибрационной обработки с использованием метода конечных элементов / А. Ю. Деньщиков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 19. – С. 79–82.

3. Деньщиков А. Ю. Моделирование процесса снижения остаточных напряжений посредством вибрационной обработки (осесимметричные задачи) / А. Ю. Деньщиков, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 20. – С. 23–28.

Здобувачеві належить розробка математичної моделі і програмних засобів для її реалізації, реалізація та аналіз отриманих результатів.

4. Деньщиков О. Ю. Дослідження процесу вібраційного старіння направляючих верстатів на прикладі балок з простим напруженим станом / О. Ю. Деньщиков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 172–177.

5. Деньщиков А. Ю. Создание математической модели материала, в котором происходит процесс вибрационного старения / А. Ю. Деньщиков, Г. И. Львов, А. Н. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 20. – С. 73–80.

Здобувачеві належить аналіз літературної інформації та створення на її основі власної моделі; виведення рівнянь для випадку зі сковзанням, проведення параметричного аналізу, вивчення впливу різних параметрів і аналіз поведінки отриманої моделі.

6. Деньщиков А. Ю. Теоретическое и экспериментальное изучение возможности применения вибрационной обработки для уменьшения уровня остаточных напряжений в сварных конструкциях / А. Ю. Деньщиков, В. М. Семенов, С. В. Подлесный // Прогресивні технології та системи машинобудування : збірник наукових праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – Вип. 29. – С. 66–71.

Здобувачеві належить постановка задачі, проведення теоретичних досліджень та обробка даних експерименту.

7. Деньщиков А. Ю. Теоретико-экспериментальное исследование процесса вибрационного старения / А. Ю. Деньщиков, А. Н. Беш, С. В. Подлесный, А. И. Дрыга // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного

університету ім. Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолНТУ, 2005. – Вип. 16. – С. 69–73. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).

Здобувачеві належить постановка задачі, проведення теоретичних досліджень, планування експерименту, участь у його проведенні, обробка отриманих експериментальних даних.

8. Деньщиков А. Ю. Процесс вибрационного старения в толстостенных трубах / А. Ю. Деньщиков // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолНТУ, 2009. – Вип. 3, т. 1. – С. 60–66. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).

9. Деньщиков О. Ю. Основні теоретичні залежності процесу зменшення залишкових напружень засобом вібраційної обробки (одновісні задачі) / О. Ю. Деньщиков, Г. І. Львов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 15–16 травня 2003 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – С. 81.

10. Деньщиков А. Ю. Исследование процесса вибрационного старения направляющих станков на примере балок з простим напруженим состоянием / А. Ю. Деньщиков // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали третьої міжнародної науково-практичної конференції, 3 червня 2005 р. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 116.

АНОТАЦІЇ

Деньщиков О. Ю. Зниження залишкових напружень у елементах машинобудівних конструкцій методом вібраційної обробки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі розробки розрахункового методу оцінювання рівня залишкових напружень в елементах машинобудівних конструкцій при вібраційній обробці (вібраційному старінні).

Запропоновано механічну модель, яка дозволяє описати поведінку матеріалу конструкції в процесі вібраційної обробки. Виконано аналіз моделі при різних режимах навантаження. Визначено умови, за яких модель якісно відображає зниження залишкових напружень в процесі вібраційного старіння. На основі проведеного аналізу запропоновані феноменологічні рівняння стану матеріалу, коефіцієнти яких знаходяться за допомогою апроксимації експериментальних кривих релаксації. Розроблено комплекс математичних моделей і програмних засобів для аналізу процесів релаксації залишкових напружень при вібраційній обробці конструкцій.

Вирішено задачі зниження залишкових напружень у вісесиметричних конструкціях: товстостінній трубі при осьовому періодичному динамічному навантаженні, круглій пластині, що має зонтичну форму коливань. Одержано розрахункові дані про розподіл залишкових напружень у реальних елементах машинобудівних конструкцій: опорі склепіння доменної печі, зварних балках

таврового й двотаврового поперечного перерізів. У ході експериментальних досліджень підтверджено основні гіпотези, що лежать в основі розроблених математичних моделей і феноменологічних рівнянь. Представлено практичні рекомендації щодо раціонального вибору параметрів вібраційної обробки з метою зменшення залишкових напружень. Одержані рекомендації та комплекс програмних засобів впроваджені у виробництво та забезпечили підвищення техніко-економічних параметрів процесу вібраційного старіння.

Ключові слова: коливання, динамічні навантаження, залишкові напруження, релаксація, вібраційне старіння.

Деньщиков А. Ю. Снижение остаточных напряжений в элементах машиностроительных конструкций методом вибрационной обработки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Диссертационная работа посвящена решению научно-практической задачи разработки расчетного метода оценки уровня остаточных напряжений в элементах машиностроительных конструкций при вибрационной обработке (вибрационном старении).

Предложена механическая модель, которая позволяет описать поведение материала конструкции в процессе вибрационной обработки. Выполнен анализ модели при различных режимах нагружения. Определены условия, при которых модель качественно отражает снижение остаточных напряжений в процессе вибрационного старения. На основе проведенного анализа предложены феноменологические уравнения состояния материала, коэффициенты которых находятся при помощи аппроксимации экспериментальных кривых релаксации. Разработан комплекс математических моделей и программных средств для анализа процессов релаксации остаточных напряжений при вибрационной обработке конструкций.

Рассмотрены упругопластические деформации и предоставлены расчеты вибрационной релаксации напряжений в стержнях при одноосном напряженном состоянии. Анализ результатов свидетельствует, что феноменологическое уравнение отражает качественные особенности снижения остаточных напряжений при вибрационной обработке.

Изучен процесс релаксации остаточных напряжений в стержне, в котором и исходное напряженное состояние, и динамическое нагружение соответствуют чистому изгибу. Отмечено, что общий уровень напряжений уменьшился, при этом характер распределения напряжений в сечении имеет нелинейный характер.

Решены задачи снижения остаточных напряжений в осесимметричных конструкциях: толстостенной трубе под действием осевых периодических динамических нагрузок, круглой пластине, имеющей зонтичную форму колебаний. Получены численные решения сформулированных задач, построены эпюры внутренних напряжений до и после процесса вибрационной обработки, сделан анализ полученных зависимостей.

Адаптированы основные теоретические зависимости метода конечных элементов для расчета процесса вибрационного старения. Разработан комплекс программных средств по расчету процесса вибрационного старения методом конечных элементов. Проведено численное исследование процесса релаксации остаточных напряжений в случае чистого изгиба балки при помощи созданного программного комплекса. Сопоставление погрешности расчета при помощи метода конечных элементов с проведенным ранее численно-аналитическим расчетом показали сопоставимость результатов, при этом разность абсолютных значений остаточных напряжений не превысила 5 %.

Получены расчетные данные о распределении остаточных напряжений в сварных балках таврового и двутаврового поперечного сечений. При этом остаточные напряжения рассчитывались по известной методике Талыпова. Разработанным комплексом программных средств по расчету процесса вибрационного старения определены остаточные напряжения виброобработки.

Создана конечноэлементная модель реальной конструкции, используемой в литейном производстве – опоры свода доменной печи. Для создания модели был использован программный продукт COSMOS/M. Расчет остаточных напряжений после сварки произведен по методу Талыпова. Для получения величины остаточных напряжений после процесса вибрационного старения применялся разработанный программный комплекс.

Проведен анализ влияния на показатели качества процесса вибрационного старения различных технологических параметров, таких как порядок обработки на резонансных частотах, влияние условий закрепления и места расположения вибратора; получены количественные оценки снижения величины остаточных напряжений. В качестве критерия улучшения качества использована величина остаточных напряжений в срединном сечении опоры свода доменной печи.

В результате проведенных экспериментальных исследований по вибрационной обработке стержневых элементов получены зависимости изменения величины остаточных напряжений от количества циклов приложения нагрузки (кривые релаксации). Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее:

- кривые релаксации нелинейны: с увеличением количества циклов обработки скорость уменьшения остаточных напряжений снижается;
- релаксационные процессы происходят при таких значениях остаточных и динамических напряжений, при которых их сумма не превышает предела текучести.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований были подтверждены основные гипотезы, лежащие в основе разработанных математических моделей и феноменологических уравнений. Полученные данные были использованы для определения коэффициентов феноменологической зависимости, используемой впоследствии для численных расчетов.

Проведены исследования процесса вибрационной обработки для сварных балок таврового и двутаврового поперечного сечений. Получены эпюры остаточных напряжений путем обработки кривых изменения коэффициентов магнитной проницаемости. Из сравнения расчетных данных, которые приведены в четвертом разделе работы, с экспериментально определенными значениями

остаточных напряжений установлено, что качественный характер и численные значения эпюр напряжений является весьма близкими. Погрешность для максимальных значений не превышает 6 %, что находится в пределах допустимых для инженерных расчетов.

Изучен процесс вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений сварной конструкции, применяемой в литейном производстве, – опоры свода доменной печи. Определено изменение остаточных напряжений в процессе вибрационной обработки в контрольных точках. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов исследования показывает высокую точность предложенной математической модели. Представлены практические рекомендации по рациональному выбору параметров вибрационной обработки с целью уменьшения остаточных напряжений. Полученные рекомендации и комплекс программных средств внедрены в производство и обеспечили повышение технико-экономических параметров процесса вибрационного старения.

Ключевые слова: колебания, динамические нагрузки, остаточные напряжения, релаксация, вибрационное старение.

Denschikov A. Y. Vibratory stress relief. – Manuscript.

Thesis on Competition of a Scientific Degree of the Candidate of Engineering Science on a Speciality 05.02.09 –dynamic and strength of machines. National technical university «Kharkiv polytechnical institute», Kharkov, 2010.

Dissertation work is devoted the decision of scientifically - practical task of development of calculation method of estimation of level of remaining stress in the elements of machine-building constructions at vibration treatment (vibratory stress relief).

A mechanical model which allows describing the conduct of material of construction in the process of vibration treatment is offered. The analysis of model is executed at the different modes of lading. Terms at which a model quality reflects the decline of remaining stress in the process of vibratory stress relief are definite. On the basis of the conducted analysis phenomena equalizations are offered the states of material, coefficients of which are through approximation of experimental curves of relaxation. The complex of mathematical models and programmatic facilities is developed for the analysis of processes of relaxation of remaining stress at vibration treatment of constructions.

The tasks of decline of remaining stress are solving in axisymmetrical constructions: to the thickwall pipe under the influence of the axial periodic dynamic loads, round plate, having an umbellate form of vibrations. Calculation information is got about distributing of remaining stress in the real elements of machine-building constructions: to support of vault of high furnace, welding beams t-shaped and double-T transversal sections. During experimental researches basic hypotheses, lying in basis of the developed mathematical models and phenomena equalizations, were confirmed. Practical recommendations are presented on the rational choice of parameters of vibration treatment with the purpose of diminishing of remaining stress. The got recommendations and complex of programmatic facilities are applied in industry and provided the increase of technic – economic parameters of process of vibration senescence.

Keywords: vibration, dynamic loads, remaining stress, relaxation, vibratory stress relief.



Наукове видання

Деньщиков Олександр Юрійович

**ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ**

Автореферат

Відповідальний за випуск
канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри технічної механіки ДДМА
С. В. Подлесний

Підп. до друку 26.01.2011. Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 32.

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
серія ДК №1633 від 24.12.2003