

УДК 620.179:621.373.5

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Кондратенко І.П., д.т.н.,

Божко І.В., к.т.н.,

Інститут електродинаміки НАН України

Жильцов А.В., д.т.н.,

Васюк В.В., аспірант*.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація - виконано огляд існуючих методів визначення залишкових напружень, визначені їх основні переваги та недоліки, сфери застосування.

Ключові слова - залишкові напруження, неруйнівні методи визначення, інтерферометрія, електропластична деформація.

Постановка проблеми. Застосування нових матеріалів, інтенсифікація виробничих процесів і зростання рівня експлуатаційних навантажень висувають нові вимоги до створюваних конструкцій. Забезпечення міцності, підвищення точності виготовлення, якості, працездатності елементів і вузлів конструкцій, багато в чому визначаються рівнем напруженого стану, що виникає в процесі їх виготовлення та експлуатації.

Залишкові напруження впливають на працездатність конструкцій. Як рівень, так і розподіл напружень, може бути критичним для робочих характеристик і повинен враховуватися при виготовленні виробів і конструкцій. Ця проблема вирішується в кількох напрямках, серед яких важлива роль належить розробці та широкому застосуванню сучасних методів і засобів визначення залишкових напружень. Їх ефективність визначається, насамперед надійністю в роботі та достовірністю отриманих результатів.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження залишкових напружень традиційними експериментальними методами (електротензометрія, механічна тензометрія тощо) є трудомісткими і потребують виконання великого обсягу вимірювань із застосуванням спеціального устаткування та приладів. У зв'язку з цим розвиток нових методів та засобів оперативного визначення залишкових

* Науковий керівник: д.т.н. Жильцов А.В.

© д.т.н. Кондратенко І.П., к.т.н. Божко І.В., д.т.н. Жильцов А.В., аспірант Васюк В.В.

напружень в елементах конструкцій на етапі їх виготовлення та експлуатації є актуальною науково-технічною задачею.

Формулювання цілей статті. Метою досліджень є класифікація та порівняння існуючих методів визначення залишкових напружень, визначення їх переваг та недоліків.

Основна частина. Залишкові напруження [4] виникають, як правило, в зонах концентрації в процесі навантаження конструкції або вносяться ще на стадії її виготовлення і врівноважуються в ній без докладання якихось сил. Залишкові напруження зазвичай класифікують за ознаками протяжності силового поля і фізичної сутності. Загальноприйнятою є класифікація [8] за довжиною силового поля.

Напруження 1-го роду – макронапруження. Вони охоплюють області, співмірні з розмірами деталі, і мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі, існуючі методи оцінюють головним чином залишкові напруження 1-го роду.

Напруження 2-го роду – мікронапруження, що поширюються на окремі зерна металу або на групу зерен, визначаються рентгенографічними методами.

Напруження 3-го роду – субмікроскопічні, пов'язані з спотворенням атомної решітки кристала, методи визначення напружень 3-го роду ще недостатньо розроблені.

З точки зору способів впливу (рис. 1), руйнівні методи дозволяють одержувати найбільш повну інформацію: дані про напруження по всьому об'єму. Малоруйнівні і неруйнівні методи в більшості випадків призначені для дослідження напруженого стану поверхні. Однак при цьому перші припускають повне руйнування, а другі вимагають лише створення локального дефекту на поверхні при збереженні цілісності об'єкта.

В цілому методи визначення залишкових напружень поділяються на: методи впливу на об'єкт(руйнуючі і мало руйнуючі), націлені на прояв внутрішніх напружень, і методи отримання даних(не руйнуючі), що є вихідними при розрахунку залишкових напружень.

Руйнуючі методи засновані на припущенні, що розрізання або видалення частини деталі із залишковими напруженнями еквівалентна додатком до залишившийся частини деталі, напружень зворотного знаку, рівних за абсолютною величиною залишковим.

Механічні методи засновані на принципі пружного розвантаження об'єму металу при його звільненні від залишкових напружень шляхом розрізання або іншої механічної дії. Вимірюючи деформації, що виникають при цьому, можна обчислити залишкові напруження за формулами теорії пружності.

Малоруйнуючі методи засновані на використанні поверхневого шару для контролю залишкових напружень шляхом виконання на по-

верхні канавок, отворів, пропилив, стовпчиків і контролю деформацій а також твердості у зоні руйнування.



Рис. 1. Методи вимірювань залишкових напружень з точки зору способів впливу.

Метод визначення твердості заснований на зміні твердості під впливом залишкових напружень, дозволяє визначити порівняльну зміну величини залишкових напружень в поверхових шарах матеріалу. Можна оцінити рівень і знак напружень по різниці твердості виробу та еталонного зразка, в якому завідомо відсутні залишкові напруження.

Не руйнуючі методи засновані на зміні тих чи інших фізичних властивостей матеріалів залежно від ступеня пружного деформування. Відносно слабка вивченість необхідних [3] властивостей, стосовно до визначення залишкових напружень, істотно обмежує їх можливості.

Рентгенівський метод [7] заснований на прецизійному вимірюванні змін міжплощинних відстаней, що визначаються по зсуві дифракційної лінії. Інакше: заснований на явищі дифракції рентгенівських

променів при проходженні через кристалічну решітку. Рентгенівський метод дозволяє визначати напруження в деталях складної геометричної форми, необмежених розмірів, досліджувати напруження на дуже малих ділянках поверхні зразка, вимірювати градієнти напружень, визначати миттєві напруження в деталях, що піддаються періодичним навантаженням. Недоліки: знижена точність при роботі з сильнодеформованими і грубозернистими матеріалами, неможливість одночасного визначення в декількох точках, розділенні макро- і мікронапружень.

Ультразвуковий метод [1] ґрунтується на залежності швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від напруженого стану. Це неруйнівний метод, що дозволяє застосовувати його при дослідженні відповідальних конструкцій. Однак, неоднорідність механічних властивостей істотно впливає на швидкість пружних хвиль [5], що обмежує застосування методу в зварних конструкціях.

Метод електропровідності металів заснований на зміні електропровідності що реєструється або шляхом її прямого виміру, або струмовихровим методом. Прямий метод визначення вимагає наявності апаратури з високою чутливістю, а струмовихровий – простий у використанні і придатний для промислового застосування.

Метод магнітної пам'яті заснований на реєстрації власних магнітних полів розсіювання, що виникають на устаткуванні в локальних зонах концентрації напружень під дією робочих навантажень. При цьому величину магнітних полів розсіювання в об'єкті контролю відображає тензор деформації і напруження.

Переваги: не впливає на стан матеріалу в процесі визначення. Не використовуються намагнічуючі пристрої. Не потребує попередньої підготовки поверхні. Можливість оцінки: ступеня «засміченості» зварних швів дефектами, розподіл залишкових напружень в зонах концентрації напружень, а для однотипних сполук – відносний рівень напружень, якість та ефективність техніки вимірювання.

Недоліки: необхідність додаткового використання традиційних методів дефектоскопічного об'ємного контролю для встановлення точного виду дефекту та визначення його розмірів, відсутність кількісних критеріїв розбракування за виглядом і за розмірами внутрішніх дефектів.

Поляризаційно-оптичний метод заснований на використанні пружно-оптичного ефекту для визначення залишкових напружень або напружень від зовнішніх навантажень. Пружно-оптичний ефект виявляється в появі в прозорих матеріалах подвійного променезаломлення під дією напружень. Кількісно цей ефект виявляється через порядок ізохром як функції двох змінних: відносного подовження і нормального напруження. Досліджуваний об'єкт поміщають між поляризатором і аналізатором.

Таблиця 1 – Порівняння методів вимірювання залишкових напружень

Метод знаходження	Матеріал	Руйнівний (+), не руйнівний (-)	Контактний(+), безконтактний (-)	Шкідлива дія	Локалізація	Класифікація	Необхідність підготовки поверхні	Зменшення залишкових напружень
Механічний	конструкційні матеріали	+	+	ні	поверхневі, внутрішні	макронапруження	ні	ні
Висвердлювання отворів	метали, сплави, полімерні матеріали	+	+	ні	поверхневі, внутрішні	макронапруження	так	ні
Вимірювання твердості	конструкційні матеріали	+	+	ні	поверхневі, внутрішні	макронапруження	ні	ні
Рентгенівський	конструкційні матеріали	+	-	так	поверхневі, внутрішні	макронапруження	ні	ні
Ультразвуковий	метали, сплави, полімерні матеріали	-	+	ні	поверхневі, внутрішні	макронапруження	так	ні
Магнітопружний	феромагнітні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	ні	так
Магнітошумовий	феромагнітні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	ні	так

Продовження таблиці 1

Метод знаходження	Матеріал	Руйнівний (+), не руйнівний (-)	Контактний (+), безконтактний (-)	Шкідлива дія	Локалізація	Класифікація	Необхідність підготовки поверхні	Зменшення залишкових напружень
Електропластичної деформації	феромагнітні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	ні	так
Магнітної пам'яті	феромагнітні матеріали	-	+	ні	внутрішні	макронапруження	так	ні
Поляризаційно- оптичний	конструкційні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	так	ні
Крихких покривтів	конструкційні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	так	ні
Електропровідності	конструкційні матеріали	-	+	ні	поверхневі	макронапруження	так	ні
Інтерферометрія	метали і неметали	+	-	ні	поверхневі	макронапруження	ні	ні

Залишкові напруження визначають з використанням оптично чутливих матеріалів як покриттів. Для цього на певні ділянки виробу наклеюються оптично-чутливі пластини певної товщини і складу (на базі епоксидних і поліамідних смол).

Метод крихких покриттів дає можливість спостерігати напружений стан у виробі. На поверхню досліджуваного об'єкта наносять спеціальний лак, який дає після висихання дуже крихке покриття, міцно поєднане з виробом. У процесі дослідження фіксується напрямок і довжина тріщин, відстань між суміжними тріщинами. Тріщини в лаку виникають лише в результаті розтягуючих напруг, тому для дослідження стискаючих напруг виріб піддається попередньому стисненню. Тріщини виникають при розвантаженні виробу. У місцях появи перших тріщин є найбільші напруження в поверхневому шарі.

Електромагнітні методи [6]. Дана група методів базується на залежності між магнітними властивостями металу і величиною діючих в даній області залишкових напружень. Однак, крім даної залежності, є і залежність від величини зерна, хімічного складу, структури. Тому результати вимірювань, отримані на зразках зі структурною неоднорідністю, наприклад, у зварних швах, носять неоднозначний характер. Методи придатні для визначення залишкових напружень тільки в зразках з металів і сплавів, з магнітними властивостями. Глибина проникнення електромагнітного поля у феромагнетиках залежить від частот живлення електромагнітних пристроїв, що збуджують поле.

Електромагнітні методи значно продуктивніші, ніж тензOMETричний або оптичний. Найбільш доцільно його застосування для оперативного контролю (оцінки) зміни залишкових напружень.

Магнітопружний метод заснований на зміні магнітної проникності під дією механічних напружень. Зміна магнітної проникності виявляється по зміні магнітної індукції за умови сталого зовнішнього магнітного поля. Метод передбачає попереднє тарування на еталонних зразках, у тому числі під навантаженням. Вимірювання можна проводити також лише на феромагнітних матеріалах. Він також виявляється мало-придатним для визначення залишкових напружень в зварних швах через виникаючі в них неоднорідності фізичних властивостей.

Магнітошумовий метод заснований на ефекті Баркгаузена, що полягає в стрибкоподібній зміні намагніченості при плавній зміні перемагнічування поля. Стрибки в намагніченості пов'язані із затримкою руху доменних меж в місцях концентрації залишкових напружень. На ділянці контрольованого матеріалу, що піддається впливу змінного магнітного поля, фіксується магнітний шум, як наслідок стрибкоподібної зміни намагніченості. Параметри шуму відповідають величині залишкових напружень.

Одним з перспективних напрямів є метод електропластичної деформації, принцип якого полягає в додатковій дії на метал електричного струму, густина якого перевищує деяке граничне значення. При цьому відбувається пружне розвантаження залишкових напружень в металі. Це явище слугить основою способу неруйнуючого визначення залишкових напружень методом електронної спектр-інтерферометрії. Однак не зважаючи на широке застосування електропластичної деформації, механізми, яким підлягає це явище, на сьогодні до кінця невідомі. Вважається, що в процесі локального пружного розвантаження головний внесок належить інтенсивним дислокаційним взаємодіям, які обумовлені протіканням електричного струму. Ці взаємодії залежать від струмового імпульсу: амплітуди, тривалості фронту і усього імпульсу. Вплив цих параметрів на процес електропластичної деформації достатньо не вивчений.

Сутність інтерферометричного методу визначення залишкових напружень [2] полягає у порівнянні двох хвильових фронтів світлових хвиль, відбитих від поверхні досліджуваного об'єкта до і після локального розвантаження.

Висновки. Кожен з описаних вище методів (рис. 1) має свої переваги і недоліки. Найбільш достовірні механічні методи. Проте вони вимагають «руйнування» або порушення цілісності конструкції. Механічні методи вимірюють конкретні значення напружень в конкретній області.

Визначення полів напружень з різними величинами залежно від координати вимагає проведення цілого ряду вимірювань. Ряд неруйнуючих методів дозволяє «візуалізувати» поле напружень. Вони не вимагають руйнування конструкції. В деяких випадках їм необхідні зразки-еталони, зроблені з того ж матеріалу, але вільні від залишкових напружень. Без них результати вимірів можуть бути інтерпретовані абсолютно некоректно.

До вибору методу необхідно підходити в залежності від об'єкту, де необхідно провести вимірювання. Великий ефект може дати комплексне використання різних методів. Існує значна необхідність в розробці методів визначення залишкових напружень, які б поєднували в собі мінімальний вплив на об'єкт і відсутність руйнування та точність, достовірність та простоту вимірювань.

Особливу увагу привертає метод електропластичної деформації, який поєднує в собі можливість не тільки проводити визначення залишкових напружень, але і значно зменшити їх значення.

Література:

1. Антонов А.А. Бесконтактный электростатический метод оценки НДС твердых тел / А.А. Антонов, А.А. Ифимовская, Г.Н. Чернышев // Сб. «Остаточные технологические напряжения». – М.: 1988. – С.32-38.
2. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии / [А.А. Антонов, А.И. Бобрик, В.К. Морозов, Г.Н. Чернышев]. // Механика твердого тела. – № 2. – 1980. – С.25-28.
3. Башкатов А.В. Напряжения и деформации при сварке: Учебное пособие / А.В. Башкатов, А.В. Бондарь, А.Б. Булков. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. – 82 с.
4. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1963. – 232 с.
5. Ботаки А.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А.А. Ботаки, В.А. Ульянов, В.А. Шарко. – М.: Машиностроение, 1983. – 80 с.
6. Улыбин А.В. Метод измерения электрического сопротивления для контроля механических напряжений в стальных конструкциях: автореф. диссерт. на ст. к.т.н. 05.11.01 / А.В. Улыбин. – СПб.: СПбГПУ, 2010. – 20 с.
7. Корякина В.Е. Возможности рентгеновского измерения остаточных напряжений в наплавленном валике и основном металле крупнозернистой заустенистой стали 15х23Н18Л. / В.Е. Корякина, Т.М. Новоселова, В.Е. Соломатин. // Сварочное производство. – № 9. – 2000. – С.37-38.
8. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / [Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев]. – М.: Изд-во Наука, 1996. – 231 с.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Кондратенко І.П., Божко І.В., Жильцов А.В., Васюк В.В.

Аннотация

Выполнен обзор существующих методов определения остаточных напряжений, определены их основные преимущества и недостатки, сферы их применения.

METHODS DEFINITIONS OF RESIDUAL STRESS

I. Kondratenko, I. Bojko, A. Zhiltsov, V. Vasyuk

Summary

There have been done an existing methods overview for the determination of residual stresses on the-and determined their main advantages and disadvantages, their scope.