

УДК 621.9.048

Муковоз О. О., Шеремет О. І., Чепель Ю. А.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗНЯТТЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ

Однією з найважливіших причин передчасної втрати необхідної точності, а в деяких випадках і працездатності, машинами і приладами є короблення базових деталей, що визначають взаємне переміщення різних вузлів машин у просторі, а також короблення тіл обертання (вали, шпинделі, шестірні тощо) [1].

Зміна форм і розмірів литих і зварних деталей викликається залишковими внутрішніми напруженнями, що виникають в процесі нерівномірного їх охолодження, а також в процесі механічної обробки [2]. Для зменшення залишкових напружень у литих та зварних деталях з метою стабілізації їх геометричних розмірів застосовують термодформаційні та деформаційні методи [3].

Метою роботи є аналіз сучасних методів релаксації внутрішніх напружень металевих деталей, а також виявлення переваг вібраційної об'ємної обробки.

Всі відомі методи зниження залишкових напружень у металевих деталях базуються на тепловому та силовому факторах, і залежно від переважаючого фактора існують два типи [4, 5] (рис. 1):

- методи, при яких деталь не піддається значимим силовим впливам (природне старіння, відпалювання);
- методи, при яких створюється спеціальний силовий вплив, що виконує обробку деталей (віброобробка, статичне навантаження, термоудари).

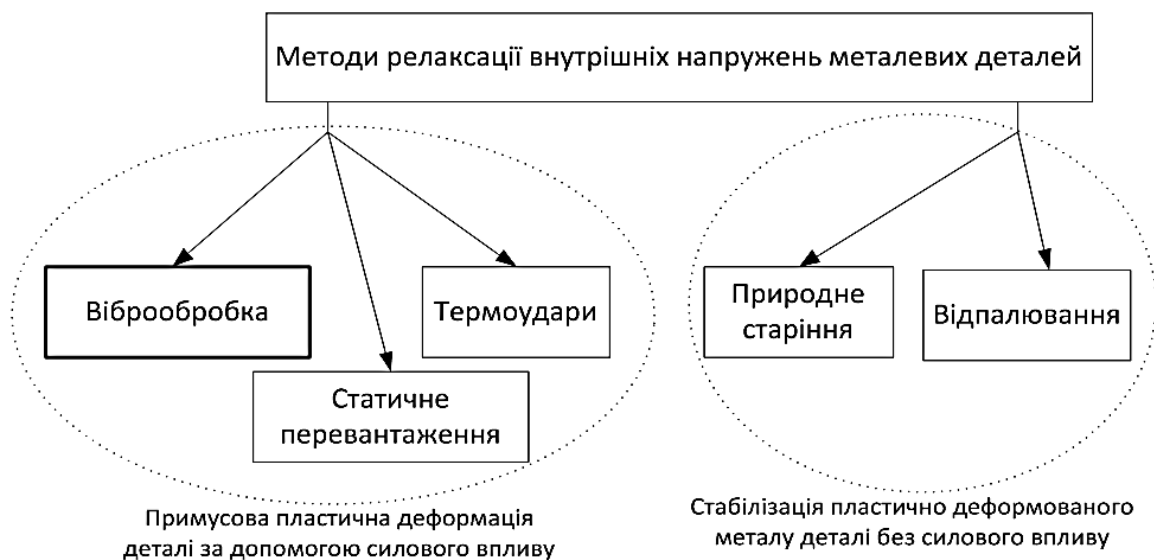


Рис. 1. Укрупнена класифікація методів зняття залишкових напружень

Найбільш поширеним в Україні і в інших країнах є метод відпалювання. Незалежно від причини появи залишкових напружень, відпалювання дозволяє знизити їх до деякого допустимого рівня або усунути.

Незважаючи на те, що досягається позитивний ефект від застосування відпалювання, слід мати на увазі також основні недоліки цього методу [6]:

- витрати на будівництво печей для відпалювання, паливо і електроенергію дуже високі в порівнянні з іншими методами;

- зниження межі міцності і межі текучості матеріалу деталі;
- існує можливість виникнення власних напружень в тому випадку, якщо викривлення, що виникло при відпалюванні, було ліквідовано за допомогою правки, або був порушений температурний режим;
- циндроутворення, а також окислення, якщо відпалювання проводилося не в середовищі захисного газу або вакууму;
- знеуглецьовування;
- знеміцнення термооброблених сталей;
- підвищення крихкості через карбідоутворення, змінюваних механічних властивостей, що призводять до непридатності деталей з причини утворення тріщин при їх експлуатації.

Метод природного старіння полягає в тривалому вилежуванні (протягом декількох місяців або років) деталей на відкритому повітрі або в приміщенні при температурі навколишнього середовища. З експериментів [4] слідує, що після річного вилежування чавунної вилівки залишкові напруження знижуються всього на 2–10 %. Очевидним недоліком природного старіння є надзвичайно висока тривалість, тому дослідники не рекомендують його використовувати в якості самостійного методу зняття залишкових напружень. Найчастіше він застосовується як додатковий після виконання відпалювання.

Метод статичного перевантаження полягає в навантаженні деталі статичними силами і моментами статичних сил і витримці її під навантаженням протягом певного часу [7, 8]. При цьому відбувається складання залишкових напруг і розтягуючих або стискаючих напружень від зовнішнього навантаження. При перевищенні сумарними напруженнями межі текучості матеріалу, відбувається пластична деформація, і локальні напруження знижуються нижче рівня, який мав місце в ненавантаженому стані. Найбільш проблемним питанням методу статичного перевантаження є вибір максимальної сили навантаження, оскільки величина і розподіл залишкових напружень в деталях складної форми часто невідомі, а незначне перевантаження може призвести до руйнування деталі в місцях зосередження найбільших механічних напружень [4]. З цієї причини метод статичного перевантаження найчастіше застосовують для стабілізації розмірів деталей нескладної форми з порівняно невеликою жорсткістю при згинанні: довгі станини, траверси, столи і т. д.

Метод термоударів базується на створенні температурних напружень в деталях при швидкому їх нагріванні і охолодженні, що призводить до тимчасового перевантаження. Основними перевагами цього методу є велика продуктивність і висока якість стабілізації розмірів. Метод використовують переважно для стабілізації розмірів виливків складної, зокрема коробчатої, форми [9]. При значній величині залишкових напружень перед проведенням термоударів здійснюють відпалювання. Недоліком методу термоударів є його енергоємність, пов'язана з інтенсивним використанням печей для швидкого нагріву деталей.

Метод динамічного навантаження або метод вібраційної обробки полягає у впливі на деталь механічними імпульсами, які формуються за певним законом [10–12]. Від статичного перевантаження він відрізняється тим, що навантаження і розвантаження деталі проходять циклічно, причому час витримки в навантаженому стані невеликий. Віброобробка викликає суперпозицію напружень, при якій в певний проміжок часу протікає локальна пластична деформація металу [13, 14]. При цьому залишкові напруження, виникнення яких спричинене деформацією кристалічної решітки, знижуються завдяки наданню металу деякого енергетичного імпульсу в процесі віброобробки [15]. В даний час віброобробка для зняття залишкових напружень проводиться на резонансних частотах деталі або на частотах близьких до них, якщо обробка на резонансних частотах неможлива з яких-небудь технічних причин [16]. Основна перевага об'ємної віброобробки на резонансних частотах деталі перед віброобробкою на частотах, відмінних від резонансної, полягає в низькому енергоспоживанні на одиницю маси, що дає можливість знімати внутрішні напруження в великогабаритних і масивних деталях.

Крім розглянутих вище методів зняття залишкових напружень в металевих деталях існує також ряд вузькоспеціалізованих методів, таких як місцева низькотемпературна обробка, імпульсне опромінення лазером, прокатка роликками, проковка, магнітно-імпульсний метод, вибухове навантаження, ультразвукове навантаження та інші. В більшості випадків ці методи не дозволяють знизити залишкові напруження по всьому об'єму деталі, вони діють локально. Місцева низькотемпературна обробка заснована на принципі компенсації деформацій, при цьому ефективність методу залежить від правильного вибору області застосування теплового впливу [5]. Імпульсний вплив лазером застосовується для опромінення зварних швів і має дуже тонкий шар проникнення, в результаті чого знімаються тільки поверхневі напруження. Прокатка роликками застосовується тільки для листових конструкцій. При проковці ефект зняття залишкових напруг поширюється на невелику глибину до 10 мм і менше [5]. Магнітно-імпульсний метод можна застосовувати для обробки пришової зони зварних з'єднань з листових елементів. Ультразвукове навантаження використовується для обробки стикових і кутових з'єднань.

Ефективність використання кожного способу зниження залишкових напружень може бути встановлена шляхом оцінки двох факторів:

- відсотку зниження залишкових напружень після обробки;
- вартості обробки.

Вченими інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона була здійснена оцінка ефективності використання більшості відомих способів зняття залишкових напружень. При розрахунку економічної ефективності застосування способів за вихідну величину приймалася вартість термічної обробки, умовно прийнята за одиницю (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння методів релаксації залишкових напружень

Метод	Відсоток зниження	Вартість
Відпалювання	40–90	1
Місцева низькотемпературна обробка	20–50	0,4
Динамічне нагрівання при низькій температурі	70	0,5–0,55
Імпульсне опромінення лазером	96	0,8
Вибухове навантаження	50–100	–
Прокатка роликками	70	0,4–0,58
Проковка	70	0,05–0,1
Магнітно-імпульсний	70	0,55–0,65
Віброобробка	85–92	0,05–0,1
Прикладення активних сил	50–100	1,2

Виходячи з табл. 1, енерговитрати при віброобробці значно нижче, ніж при термообробці. Крім того, методи віброобробки невимогливі до маси, форми і габаритів деталі, тому є одними з найбільш універсальних способів зниження залишкових напружень в литих і зварних деталях.

Впровадження віброобробки в виробництво дозволить:

- поліпшити якість виготовлених деталей для підвищення конкурентоздатності вітчизняного обладнання на міжнародному ринку;
- підвищити продуктивність праці;
- скоротити технологічний цикл і трудомісткість виготовлення виробів;
- забезпечити значне енергозбереження;
- економити метал на виготовлення деталей за рахунок зменшення припусків на механообробку при відмові від використання відпалювання (утворення циндри при нагріванні змушує збільшувати припуски);

- знизити обсяг капітальних витрат на споруди та будівлі за рахунок відмови від будівництва печей для відпалювання;
- підвищити культуру виробництва, поліпшити умови праці за рахунок зменшення обсягу гарячих і шкідливих робіт, пов'язаних з відпалюванням;
- знизити загазованість атмосфери і різкі коливання температури в виробничих приміщеннях.

З позицій системного підходу установку для віброобробки металевих деталей можна представити у вигляді деякої електромеханічної системи, яка реалізує алгоритм, що дозволяє здійснювати необхідний спосіб обробки. При цьому електромеханічна система для віброобробки може бути представлена у вигляді трьох підсистем: керування, виконання, сполучення. Підсистема керування здійснює формування завдання, що дозволяє реалізовувати необхідний спосіб обробки, стежить за процесом віброобробки і змінює завдання в залежності від ситуації, а також веде оперативний діалог з користувачем. Виконавча підсистема має таку конструкцію, яка дозволяє їй відпрацьовувати завдання, що формується системою управління і здійснювати віброобробку деталі механічними імпульсами заданої форми і тривалості, що генеруються на резонансній частоті деталі.

Підсистема керування, як правило, складається з наступних елементів: апаратних або програмних регуляторів основних координат (сили струму, віброприскорення, потужності, частоти і т. п.); датчиків, які здійснюють збір інформації про поточний стан системи; засобів введення-виведення інформації у вигляді, зручному для сприйняття користувачем (монітори, клавіатури, пульти управління, принтери, графічні і т.п.).

Виконавча підсистема включає в себе: виконавчий орган, пружну платформу необхідної жорсткості для установки деталі, а також кріпильні пристосування. В якості виконавчого органів використовують віброзбудники механічної, пневматичної або електромеханічної дії.

У більшості випадків рід і рівні сигналів, які використовуються підсистемами управління і виконання зовсім різні (наприклад, підсистема управління оперує напругою ± 5 В, а віброзбудник має номінальний струм в десятки ампер). Для виконання узгодження сигналів використовуються різноманітні підсилювачі і перетворювачі, які і складають підсистему сполучення. Крім того сигнали, що приходять з датчиків, найчастіше вимагають підсилення, тому в підсистему сполучення включають вимірювальні підсилювачі.

Таким чином, спосіб віброобробки і електромеханічна система для його реалізації є нерозривно пов'язаними і, найчастіше, вдосконалення способу віброобробки тягне за собою необхідність поліпшення і самої системи. Завдяки простоті і зручності конструкції найбільшого розповсюдження у промисловості набули дебалансні електромеханічні вібросистеми.

В процесі віброобробки деталі в локальних об'ємах, в яких зосереджуються найбільші напруження, відбуваються дислокаційні процеси, що виправляють дефекти кристалічної решітки металу, і внутрішні напруження знижуються. Наслідком цього процесу є зменшення коефіцієнта жорсткості деталі, у зв'язку з чим власні частоти деталі йдуть в область низьких. Такий характер поведінки деталі при віброобробці привів до появи декількох підходів до управління процесом віброобробки, наведених на рис. 2.

Енергетичний спосіб керування знайшов широке застосування в дебалансних вібросистемах і полягає в контролі струму віброзбудника, яким в переважній більшості є випадків є двигун постійного струму.

Амплітудно-частотний – сучасний спосіб, що полягає в записуванні і виконанні аналізу змінюваної амплітудно-частотної характеристики вібросистеми.

При фазочастотному способі керування по фазової частотної характеристиці оцінюють оптимальну частоту вібрації шляхом вимірювання фазового зсуву між двома сигналами, один з яких пропорційний амплітуді коливань, а другий – кутовому положенню обертового дебаланса.

Магнітний метод засновано на стабілізації магнітного опору металу деталі.

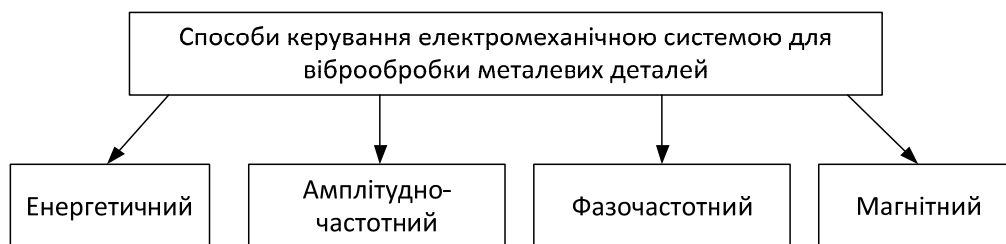


Рис. 2. Класифікація способів керування електромеханічною вібросистемою

ВИСНОВКИ

Таким чином, віброобробка є одним з найбільш економічних, продуктивних і універсальних методів зняття залишкових напружень в металевих деталях для стабілізації їх геометричних розмірів. Широко застосовувані виконавчі органи вібросистем – дебалансні віброзбудники з двигунами постійного струму – мають ряд технічних обмежень, що не дозволяють реалізувати оптимальні алгоритми віброобробки. Найбільш перспективними виконавчими органами електромеханічних систем для здійснення віброобробки є лінійні електричні двигуни зворотно-поступального руху, які дозволяють реалізовувати складні алгоритми, зокрема полігармонійної вібродії на обраних частотах, оскільки обробка на суцільному спектрі частот призводить до непродуктивних енерговитрат внаслідок присутності в ньому нерезонансних частот.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаревич С. Остаточные напряжения / С. Макаревич. – М. : Технопринт, 2003. – 352 с.
2. Чернышев Г. Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев. – М. : Наука, 1996. – 240 с.
3. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения / А. Н. Скороходов, Е. Г. Зудов, А. А. Киричков, Ю. П. Петренко / Под ред. П. И. Полухина – М. : Металлургия, 1985. – 185 с.
4. Коцюбинский О. Ю. Стабилизация размеров чугуновых отливок / О. Ю. Коцюбинский. – М. : Машиностроение, 1974. – 296 с.
5. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.
6. Разработка, изготовление, исследование и внедрение в производство нового высокопроизводительного оборудования для принудительного ускорения процесса релаксации внутренних напряжений и стабилизации геометрических размеров корпусных и базовых деталей станков : отчет о НИР / Краматорский индустриальный ин-т. – Краматорск, 1978. – 62 с. – № ГР 77023354. – Инв. № Б 731695.
7. Кудрявцев П. И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений / П. И. Кудрявцев. – М. : Машиностроение, 1964. – 96 с.
8. Адоян Г. А. Стабилизация геометрической формы отливок методом статической перегрузки / Г. А. Адоян, А. М. Герчиков, Э. Ч. Гини // Литейное производство. – 1966. – № 11. – С. 35–37.
9. Коцюбинский О. Ю. Новый метод старения чугуновых отливок с помощью термических напряжений / О. Ю. Коцюбинский, Я.И. Оберман, А. М. Герчиков // Литейное производство. – 1962. – № 4. – С. 41–42.
10. Иванова Г. Н. Вибростабилизирующая обработка металлических деталей / Г. Н. Иванова, М. Н. Могильнер, В. Г. Полнов. – Алма-Ата : КазНИИИТИ, 1987. – 59 с.
11. Коцюбинский О. Ю. Вибрационное старение чугуновых отливок / О. Ю. Коцюбинский, А. М. Герчиков // Литейное производство. – 1961. – № 8. – С. 31–34.
12. Рагульскис К. М. Вибрационное старение / К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, К. Б. Толутис. – Л. : Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1987. – 71 с.
13. Панин В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Э. В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 229 с.
14. Троценко В. Т. Циклические деформации и усталость металлов / В. Т. Троценко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский. – К. : Наукова думка, 1985. – 441 с.
15. Горенко В. Г. Статические и динамические способы снижения уровня остаточных напряжений и стабилизации размеров отливок / В. Г. Горенко, П. В. Русанов // Повышение надежности и долговечности литых деталей. – К. : Ин-т проблем литья, 1987. – С. 23–29.
16. Русанов П. В. Установка «Вибростард» для виброрезонансной обработки отливок / П. В. Русанов, В. Г. Горенко, О. И. Шинский // Автоматизация специальных способов литья. – К. : Ин-т проблем литья, 1987. – С. 70–75.