

УДК 621.789.982.9

В.О. Колот, к.т.н.  
О.В. Колот, д.т.н.**ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАРІННЯ ДЛЯ  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Закрите акціонерне товариство «МІНТЕТЕК», м. Краматорськ

Донбаська державна машинобудівна академія, e-mail: avk@minetek.donetsk.ua

*Розглянуті особливості застосування енергозберігаючої технології вібродеформаційного старіння в підвищенні якості виробів. Запропоновані прогресивні технологічні рішення і сучасне комп'ютеризоване технологічне обладнання з можливістю контролю і паспортизації процесу стабілізації залишкових напружень. Показана ефективність низькочастотної резонансної обробки нежорстких деталей.*

Надійність і ефективність функціонування металевих виробів в значній мірі визначається стабільністю форми і точністю геометричних параметрів деталей.

Основною перешкодою на шляху підвищення якості і продуктивності виготовлення нежорстких деталей є деформації, що виникають внаслідок дії залишкових напружень при різних видах технологічного впливу, як правило, при термічній обробці, обробці зняттям припусків і поверхневим пластичним деформуванням.

Традиційні методи вирішення даної проблеми являються малоефективними і багато витратними.

За останні роки в машинобудівних галузях поширюється використання деформаційних методів боротьби з наслідками залишкових напружень. Вони характеризуються засобами переважно механічного впливу на залишковий напружений стан деталі і включають: метод статичного навантаження; метод, заснований на розтяганні деталей; метод, заснований на дії вибухової хвилі; метод ультразвукового впливу; метод, заснований на дії змінного магнітного поля; звукове деформаційне зміцнення; вібраційна резонансна обробка.

Кожний із зазначених вище методів має свою область застосування. Найбільш універсальне застосування має вібраційна низькочастотна резонансна обробка.

В закордонній і вітчизняній практиці вібраційну обробку відносять до методів штучного (деформаційного, форсованого) старіння. Отже цей метод і зокрема в резонансному режимі може бути віднесений, по класифікаційним ознакам, в силу фізичного механізму релаксації і перерозподілу залишкових напружень, до особливої категорії деформаційного старіння.

Всі деформаційні методи, при раціональних впливах на деталь, а також природний метод старіння, знижують величину залишкових напружень, всього до 15 %, але значно збільшують ступінь їх стабільності, в т.ч. за рахунок перерозподілу напружень.

Вітчизняна і закордонна практика використання в промисловості технології вібраційної стабілізуючої обробки має у своєму розпорядженні майже піввіковий досвід її поступального розвитку [1]. За цей період визначені особливості технології, переваги і недоліки, області застосування, досягнуті певні успіхи в розробці засобів оснащення для її реалізації [2].

Однак на практиці застосування цієї технології, незважаючи на явні переваги перед іншими методами обробки, стримуються. Основна причина – недостатня інформованість про процеси, що відбуваються в деталі під впливом резонансних динамічних коливань, відсутність надійного і достовірного контролю й упередженість виробничників про зниження запасу міцності деталей, підданих віброобробці. В той же час відмічається ефект зниження здатності металу до тріщиноутворення, що безумовно являє собою позитивним фактором [3].

Дослідженнями, проведеними в останні роки показано, що віброобробка може бути надійним і ефективним засобом підвищення якості нежорстких деталей [4]. А при застосуванні раціональних режимів віброобробки з використанням комп'ютерної діагностики оброблюваних деталей існує можливість зробити цей процес контрольованим і розширити потенційні можливості процесу на такі області як керування точністю форми і розмірів, підвищення міцності конструкції.

Найбільш істотний прогрес досягнуто при використанні вібраційних систем з енергетичним

методом, що заснований на явищі демпфірування конструкції в процесі зміни її залишкового напруженого стану. Механічна енергія вимушених коливань демпфірується на границях зерен за рахунок внутрішнього тертя. При цьому в місцях, де напруження мають велике (пікове) значення, у так званих концентраторах напружень, відбувається більше демпфірування. Цього може бути досить для надання руху дислокацій і вирівнювання скривлень кристалічних решіток, внаслідок чого відбувається згладжування пікових залишкових напружень і зміна споживаного струму двигуна у бік його зменшення, а також зміна амплітуди коливань деталі при одночасному зменшенні смуги пропускання резонансної частоти. Зазначені параметри характеризують зміни напруженого стану деталі.

Математичний опис параметрів вібростабілізуючої обробки з нижче наведеними припущеннями можна представити у наступному вигляді.

Внаслідок відомих математичних моделей, що застосовуються при описі поведінки матеріального середовища в процесі навантаження і деформації і феноменологічних досліджень восьми середовищ при навантаженні і деформації за базову модель прийнята механічна модель узагальненого лінійного середовища (рис. 1).

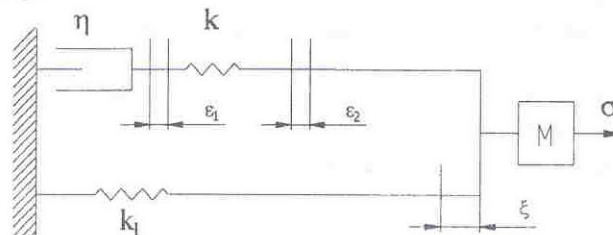


Рис. 1. Дослідження моделі узагальненого лінійного середовища

В основу ідеалізованих подань поведінки матеріалу середовища покладено взаємозалежність поєднання припущень про абсолютно пружне тіло, про ідеальну пластичність та про Ньютонову в'язкість матеріалу.

Прийнята гіпотеза припускала, що внаслідок поєднання таких припущень, можна очікувати на виникнення "ефекту взаємодії", коли результат уже не є звичайною сумою незалежних явищ. Дослідження моделі узагальненого лінійного середовища дозволили представити її у вигляді математичної залежності рівняння руху при впливі гармонічного вібратора

$$\xi = \xi_0 e^{i\varphi} \quad (1)$$

де

$$\xi_0 = \frac{Q_0}{(k_1 - M\omega^2)^2 + \omega^2 t_0^2 \left( k_1 \cdot \frac{t_1}{t_0} \cdot M\omega^2 \right)^{1/2}} \quad (2)$$

$$\varphi = \text{arctg} \left[ \frac{\omega \cdot t_0 \left( k_1 \cdot \frac{t_1}{t_0} - M\omega^2 \right)}{(k_1 - M\omega^2)} \right]$$

де  $\omega$  – частота коливань системи;  $Q_0$  – зусилля впливу на середовище;  $M$  – приведена маса системи;  $k_1, k_2$  – жорсткість системи відповідно до демпфірування і після;  $t_0, t_1$  – час релаксації залишкових напружень при постійній деформації і при постійному напруженні;  $\varphi$  – кут відставання деформації від напруження у коливальній системі (відображає величину внутрішнього тертя);  $\eta$  – коефіцієнт демпфірування;  $\sigma$  – напруження;  $\varepsilon_1$  – деформація демпфіруючої складової системи;  $\varepsilon_2$  – деформація пружної складової системи;  $\xi_0$  – максимальна деформація в системі під дією вібрації;  $\xi$  – величина деформації.

Аналіз поведінки даної математичної моделі показує, що при наближенні  $\omega$  до резонансної частоти зростає  $\xi$ , а внаслідок внутрішнього тертя (зсуву фаз  $\varphi$ ) відбувається поглинання енергії коливань в системі. Дослідження проведені при різноманітних  $\omega$  і  $Q_0$ . Внаслідок одержано рівняння, що описує поведінку системи з врахуванням комплексного модуля пружності, що дозволяє врахувати сумісний вплив жорсткості і коефіцієнту демпфірування та підтвердити

де 
$$\Gamma = -\frac{v^2}{2\pi^2(q+q')}. \quad (8)$$

Резонанс при релаксації забезпечується на частоті

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{v} |q - q'|. \quad (9)$$

При відсутності збуджуючого гармонічного впливу чи під дією резонансного впливу система з течією часу рухається в виділеному напрямі. Величина  $|q - q'|$  є середнє зміщення в 1 сек, в виділеному напрямі, відбите в числі переходів. Таким чином найбільший резонансний ефект має місце тоді, коли період поля дорівнює  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ , тобто середньому часу, витраченому системою на один цикл.

Цей результат показує на стохастичний характер досліджуваного резонансу. Якщо  $\omega_0$  прагне до нуля, то  $T_0$  прагне до нескінченності, так що виділений напрям руху деформації зникає і система стає нечутливою до течії часу. Отже для дисипативної системи, що складається з багатоелементної конструкції, кількість переходів її із нерівноважного стану залишкових напружень і навпаки обмежується періодом переходів, тобто чим більше кількість переходів, тим менше необхідний час обробки. Звідси випливає, що необхідно періодично проходити резонансний пік до стабілізації стану.

Встановлено, що межа міцності матеріалу знижується при збільшенні часу обробки і амплітуди коливань. Кількість циклів "n" слід обмежувати значенням розрахованим по формулі [4]

$$n = \frac{\delta_6}{E} \omega^2 \quad (10)$$

Дане технічне рішення втілене в розробленій авторами технології.

Для вирішення технологічних задач розроблене універсальне технологічне комп'ютеризоване обладнання четвертого покоління (рис. 3).

До складу технологічного обладнання входить:

- віброустановка ВСОН-2100 М (рис. 3.1);
- віброзбудник ексцентриковий (рис. 3.2);
- датчики в кількості 3-х шт. (рис. 3.3) з власним контролером (3.4);
- вібродемпфіруючі опори (рис. 3.5).

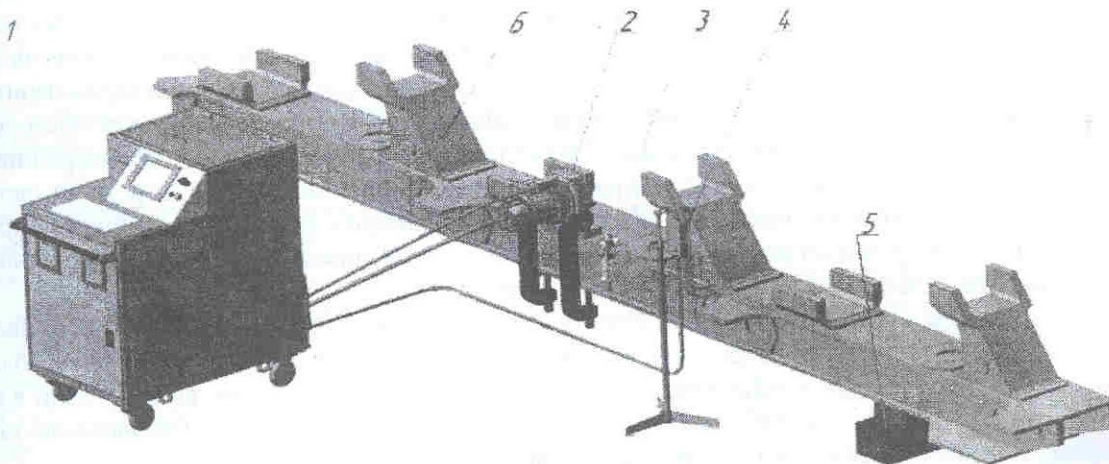


Рис. 3 Схема віброобробки боковини візка локомотива: 1 – віброустановка ВСОН - 2100 М, 2 – віброзбудник, 3 – датчики (x, y, z), 4 – контролер датчиків, 5 – вібродемпфіруючі опори, 6 – боковина ліва 2ГЭ116.30.45.036

Віброустановка побудована у вигляді мобільної шафи в передньому відсіку якої встановлений спеціальний низьковольтний електропривод постійного струму.

У верхньому відсіку шафи розташоване контрольно-керуюче обладнання, до складу якого входить промисловий комп'ютер, 8 –дюймова TFT – матриця, та повнофункціональна клавіатура, а також вмонтований спеціальний принтер з 80 мм термолентою. Задній відсік шафи служить для розташування технологічного обладнання, кабелів, віброзбудника, датчиків та інш.

В розробленому технологічному обладнанні використовується електробезпечний двигун

постійного струму з діапазоном регулювання 10-100 Гц.

Привод керується за допомогою персонального комп'ютера і дозволяє змінювати коефіцієнти та встанови програмного регулятора, значення прискорення і гальмування через інтерфейс. Для відстеження зворотнього зв'язку використовується спеціальний датчик частоти обертів вала, вбудованого в електродвигун.

Реалізація технології прискореного вібродеформаційного старіння нежорстких деталей (металоконструкцій) здійснюється за допомогою технологічного комплексу ВСОН -2100 М наступним чином:

1. Виконуються виміри на пробних режимах і виводяться у вигляді тестової гістограми на екрані монітора параметри АЧХ виробу, що обробляється (рис. 4.1.).

2. Виконується циклічна віброобробка в автоматичному режимі на технологічних режимах з контролем змін параметрів виробу на визначеній резонансній частоті (рис. 4.2) шляхом неодноразового проходження резонансного піку частоти до стабілізації АЧХ.

3. Визначається досягнута стабільність напруженого стану виробу по закінченні змін результуючої АЧХ по відношенню до вимірів в осях X, Y, Z на визначеній резонансній частоті (рис. 4.3).

4. Для визначеного режиму фіксуються результати віброобробки на зовнішньому друкууючому пристрої.

Накопичений багаторічний закордонний і вітчизняний досвід свідчить, що правильне застосування методу дозволяє докорінно змінити весь технологічний цикл виготовлення відповідальних нежорстких деталей і вирішити цілий ряд технологічних проблем.

На даний час в основному визначилися області застосування резонансної вібраційної стабілізуючої обробки і задачі, розв'язувані нею.

1. Віброобробка в процесі остигання заготовок і зварених вузлів при литті і зварюванні з вібрацією з метою підвищення якості.

2. Віброобробка загартованих сталей з метою стабілізації неврівноважених структур.

3. Віброобробка зварених металоконструкцій з метою стабілізації залишкових напружень в тому числі підвищення стійкості до тріщиноутворення.

4. Стабілізуюча вібраційна обробка проміж операціями механообробки з метою зниження припусків і обсягу доводочних робіт, підвищення якості виробів.

5. Вібраційне виправлення нежорстких деталей з метою відновлення їх форми і розмірів.

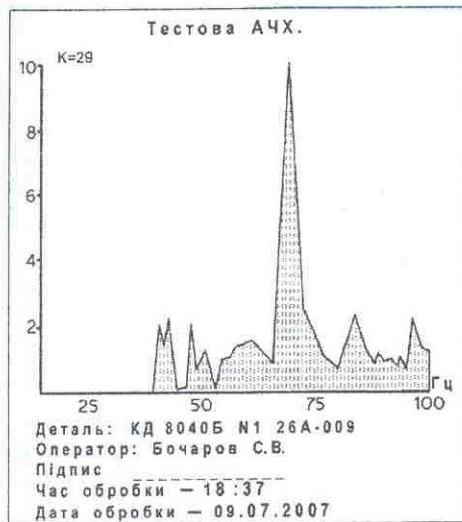
В розробленій технології передбачена можливість ефективно виконати оптимальну стабілізацію залишкових напружень в деталях з декількома ланками неоднакової жорсткості. При цьому оцінюється власна частота коливання кожної ланки і за допомогою датчиків, розташованих в трьох ортогональних площинах, розраховується результуюча АЧХ, як рівнодіюча „діагоналі паралелепіпеда”. При коливаннях в резонансному режимі і перерозподілі залишкових напружень, жорсткість деталі змінюється пропорційно амплітуді коливань. Такі коливання прийнято називати параметричними.

Параметричні коливання в даному випадку віддзеркалюють "динамічну" жорсткість деталі і мають суттєве значення для ефективного використання технології вібродеформаційного старіння. Під динамічною жорсткістю розуміється здатність деталі під впливом вимушених коливальних зусиль змінювати свою жорсткість на резонансних частотах.

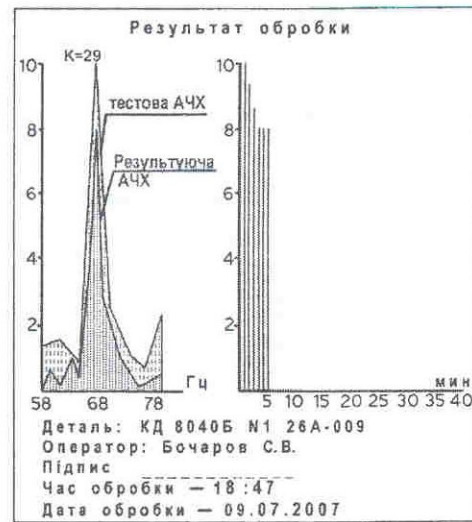
Зі зменшенням амплітуди в смузї співпадання частоти вимушених коливань і власної частоти елементів деталі – жорсткість деталі зростає. Це є логічним підтвердженням висновків, зроблених авторами [4]. Тому найбільш ефективна вібраційна обробка можлива в тому випадку коли в резонанс одночасно вводяться всі (або більшість) ланцюгів з частотою, дорівнюваною найменшому загальному кратному власних частот окремих ланцюгів деталей [5].

Внаслідок цього всі ланцюги деталі (металоконструкції) знаходяться під рівновеликим впливом резонансу.

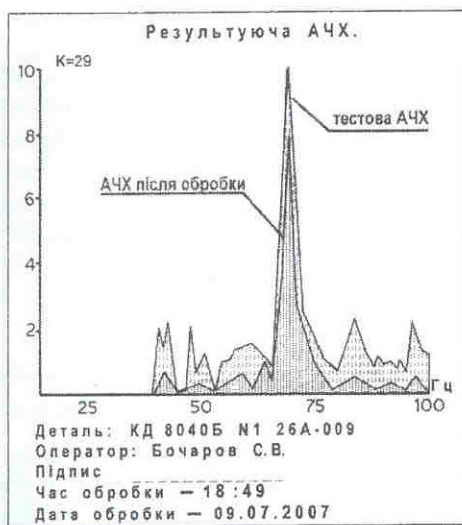
Такий підхід в технології використання вібродеформаційного старіння дозволяє використати потенційні можливості залишкових напружень в напрямку доведення процесу до інженерного керованого, а також забезпечити високу якість і міцність виробу.



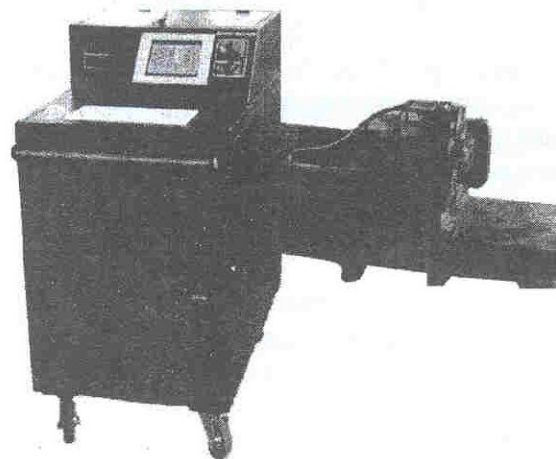
1



2



3



4

Рис. 4 Типові діаграми АЧХ: 1 – тестова, 2 – результат обробки на визначеній резонансній частоті, 3 – результуюча після віброобробки, 4 – загальний вигляд технологічного обладнання для віброобробки

Досвід використання даної технології має ВАТ „Важмехпрес”, м. Вороніж (РФ), ВАТ СКМЗ, м. Краматорськ, ВАТ Більшовик, м. Київ.

За розрахунками ХК ВАТ “Луганськтепловоз” заміна діючої технології на віброреформаційне старіння п’яти рам візків, балки і боковини з використанням ВСОН 2100 М дозволяє заощадити близько 0,5 млн. грн..

Реалізація методу вібраційного виправлення деталей з використанням потенційної енергії залишкових напружень може бути здійснена по способу [6], розробленому авторами (Рис. 5).

Використовуючи відомий ефект про те, що величину залишкових деформацій нежорстких деталей визначає, як правило, пружна післядія невірноважених початкових залишкових напружень або тимчасових, запропоновано здійснювати компенсацію похибок від жолоблення виправленням виробу вібрацією, підданих попередньому пружному вигинові в зворотному напрямку так, щоб після віброобробки виріб прогнувся на бажану величину.

Значення пружного прогину деталі зусиллями  $P_1$  при остаточній віброобробці визначаються по залежності

$$f(P_1) = \frac{2f_n \cdot f_3 - f_3^2}{f_{np}}, \quad (11)$$

де  $f_{np}$  – величина пружного прогину деталі рівного  $f_{np} = -f_n$ ;  $f_3$  – значення залишкової деформації деталі після віброобробки і розкріплення.

Вимірюють у деталі 1 початковий прогин  $f_{н0}$ , який потрібно усунути (рис. 5, а).

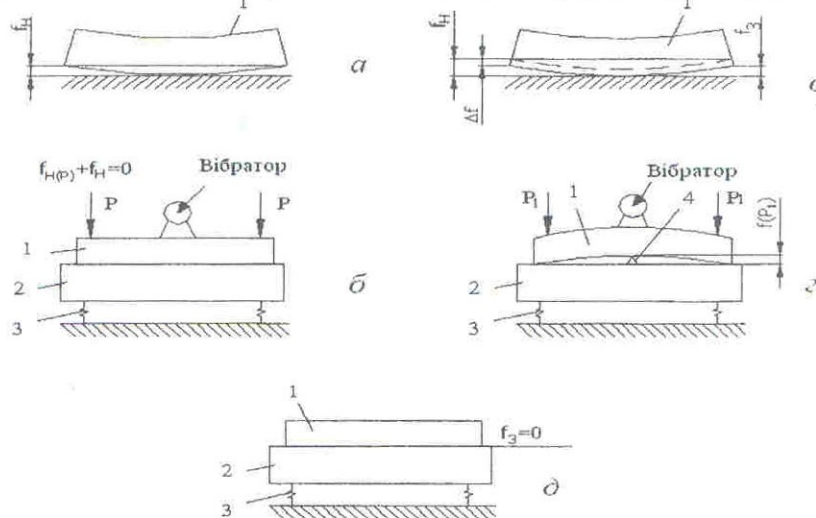


Рис. 5. Послідовність реалізації методу вібраційного виправлення деталей

Притискають деталь 1 зусиллями притиску  $P$  до площини поверхні плити 2 до компенсації прогину  $f_n$  і здійснюють віброобробку в резонансному режимі з резонансною частотою на віброізолюючих опорах 5 (рис. 5, б). Розкріплюють деталь і вимірюють залишкову деформацію  $f_3$  (рис. 5, в). Визначають значення протипрогину у залежності з формулою (11). Створюють прогин деталі убик, зворотний її залишковій скривленості зусиллями притиску  $P_1$  до поверхні плити 2 на величину  $f_{(P_1)}$  за рахунок використання прокладок 4 (рис. 5, з). Здійснюють віброобробку закріпленої деталі в режимі з резонансною частотою на прокладках 4 (рис. 5, д).

### Висновки

1. Розроблена технологія і комп'ютеризоване обладнання для низькочастотного вібродеформаційного старіння відкриває нові резерви в підвищенні якості відповідальних нежорстких деталей з одночасним заощадженням енергетичних ресурсів.
2. Облік попередньої залишкової деформації при вібраційному виправленні в пружно деформованому стані дозволяє значно підвищити якість обробки особливо деталей, схильних до тріщиноутворення.
3. Використання потенційної енергії залишкових напружень для виправлення в пружно деформованому стані нежорстких деталей найбільше ефективно при відсутності можливості усунення похибок форми за рахунок припусків на обробку.

### Список літературних джерел

1. Колот В.А. Применение ресурсосберегающих вибрационных и отделочно-упрочняющих методов обработки нежестких деталей в тяжелом машиностроении. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаша, 1991. – 56 с. – (Технология, экономика, организация производства и управления. Сер. 8 вып. 24).
2. В.Б. Струтинський, О.В. Колот. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів.: Монографія. – Краматорськ.: ЗАТ „Тираж – 51”, 2005-530 с.
3. „Эффективность” низкочастотной вибрационной обработки изделия по технологии ПДСР. ГКЛИО 104-216-95 // Публикация в Интернет-СМИ- [http://complex2005.narod.ru/Ost\\_napr.htm](http://complex2005.narod.ru/Ost_napr.htm).
4. Колот О.В. Підвищення надійності технології вібростабілізуючої обробки на основі оптимізації її режимів. Автореф., канд. тех. наук, Київ, 1997. -16с.
5. Способ снятия остаточных напряжений в деталях. Гинкул С.П., Молчанов Е.П., Колот В.А., Колот Л.П. А.С. № 899678, С21Д1/30, опубл. 1982, № 3.
6. Способ холодной правки нежестких деталей. Колот В. А., Колот Л. П., Черненко Б. Н., Ксенофонов Л. Я. А. С. №1538949, В21Д3/46, опубл. Бюл. 1990, № 4.