

1. Ляшенко Б.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине / Б.А. Ляшенко, С.А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104. 2. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. в 2 т. / М.С. Поляк – М.: Л.В.М. – СКРИПТ, Машиностроение, 1995. – Т. 1 – 832 с; Т.2 – 688 с. 3. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысов. – К.: Наукова думка, 1995. – 256 с.

УДК 620.178.5

А.Ю. Деньщиков¹, А.Н. Слипчук², С.В. Подлесный¹

¹Донбасская государственная машиностроительная академия,

²Національний університет “Львівська політехніка”

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ В ОСЕССИММЕТРИЧНЫХ ПЛАСТИНАХ

© Деньщиков А.Ю., Слипчук А.Н., Подлесный С.В., 2011

Розглянуто феноменологічну модель, що описує зняття залишкових напружень вібраційною обробкою. Розроблено залежності для розрахунку суцільної круглї пластини постійної товщини при зонтичних формах коливань. Побудовано епюри внутрішніх напружень до процесу вібраційної обробки та після неї; виконано їх аналіз.

In article representation the phenomenon model to relaxations of the remaining stress in metallic design by means of vibratory stress relief. Developed dependences for the calculation of continuous round plate of permanent thickness at the umbellate forms of vibrations. Built epures of internal stress to the process of vibratory stress relief and after it; their analysis is done.

Постановка проблемы. В процессе изготовления машиностроительных конструкций в них возникают остаточные напряжения, которые снижают срок эксплуатации конструкции и могут привести к преждевременному выходу из строя. Операция снижения остаточных напряжений является одной из наиболее трудновыполнимых и требует больших материальных затрат. В инженерной практике применяют многочисленные способы уменьшения напряжений, непрерывно совершенствуют и разрабатывают новые методы.

Один из таких методов – вибрационный метод снятия остаточных напряжений и деформаций, основанный на обработке изделий в резонансном режиме, переменными напряжениями, достаточными для упругопластических деформаций металла [1–3]. В отличие от других методов, высокая эффективность и экономичность вибрационного старения обеспечивается независимо от марки конструкционного материала. По производительности и простоте процесса вибрационное нагружение в большинстве случаев имеет преимущества перед другими методами и соответствует основным требованиям, предъявляемым к применяющимся в практике средствам снижения напряжений.

К сожалению, применение этого метода сильно ограничивается недостаточной изученностью процессов, происходящих в материале в процессе виброобработки. Остаются неопределенными оптимальные условия закрепления, точка приложения и величина возмущающей силы, время обработки изделий. Сегодня эти вопросы решаются на основании экспериментальных исследований, что зависит от личного опыта экспериментатора, при ошибках которого обработка

оказывается недостаточно эффективной и часто приводит к негативному результату (образование трещин, разрушения конструкций).

Поэтому разработка надежных расчетных методов для выбора рациональных параметров вибрационных изделий является актуальной и практически важной научно-технической проблемой, решение которой позволит повысить технико-экономические показатели процесса вибрационного старения, создать эффективные технологии и оборудование для вибрационной обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Попытки создания математических моделей для расчета процесса вибрационного старения и оценки уровня остаточных напряжений после него следует разделить на три класса:

1) модели, позволяющие оценить примерный уровень снижения величины остаточных напряжений [4]. Недостатки такого подхода очевидны;

2) реологические модели [5–7], которые качественно отражают процесс релаксации остаточных напряжений. Сегодня определение значений физических величин всех параметров, построенных моделей методами физики твердого тела, невозможно. Поэтому этот класс моделей полезен для качественных исследований;

3) модели внутренней структуры материала [8–9], предназначенные для анализа поведения кристаллической решетки в процессе вибрационного старения. Естественно, эти модели также не позволяют произвести расчет величин остаточных напряжений.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. Ранее автор предложил феноменологическую модель, позволяющую описать процесс вибрационного старения, и были произведены расчеты элементов конструкций, в которых происходит релаксация остаточных напряжений при помощи вибрационной обработки [10].

В случае сложного напряженного состояния феноменологическая зависимость изменения элементов девиатора тензора остаточной пластической составляющей деформации e_{ij}^P в процессе релаксации от количества циклов N принимает вид:

$$\frac{de_{ij}^P}{dN} = Ce \left(\frac{a\sqrt{J_2(\tilde{s} + s_a)}}{s_{-1}} \right) \tilde{s}_{ij}, \quad (1)$$

где \tilde{s}_{ij} – элементы тензора остаточных напряжений, \tilde{s}_{ij}, e_{ij}^P – элементы девиатора тензора напряжений и пластических деформаций соответственно; C и a – константы, определяемые из эксперимента; s_{-1} – предел усталости материала; s_a – тензор амплитудных значений динамических напряжений, создаваемых источником вибрации; $J_2(\tilde{s} + s_a)$ – второй инвариант девиатора суммы остаточных и динамических напряжений.

На основе предложенных уравнений состояния решены задачи анализа процессов релаксации остаточных напряжений при известных полях начальных остаточных напряжений и динамических напряжений при вынужденных колебаниях в условиях вибрационной обработки простых осесимметричных тел вращения [10].

Целью работы является разработка расчетного метода численной оценки уровня остаточных напряжений и программного обеспечения для анализа процессов релаксации остаточных напряжений в осесимметричных телах вращения при виброобработке для случая, когда величины динамических напряжений – это функция координат.

Изложение основного материала исследования. Рассмотрен случай виброобработки сплошного диска постоянной толщины. В процессе исследований предполагалось, что в системе существуют только упругие колебания, поэтому задача релаксации остаточных напряжений в диске

под действием вибрации разделяется на задачу нахождения амплитудных значений динамических напряжений и задачу релаксации остаточных напряжений в известном поле динамических напряжений.

Расчет динамических напряжений.

Диск рассмотрен как круглая сплошная пластина, свободно опертая по контуру. Дифференциальное уравнение изгиба пластины постоянной толщины h при малых перемещениях в соответствии с [11] имеет вид (2):

$$\nabla^2 \nabla^2 x = \frac{1}{D} q(r, j, t), \tag{2}$$

где $\nabla^2 \nabla^2$ – бигармонический оператор Лапласа; $\xi(r, j, t)$ – прогиб; D – цилиндрическая жесткость;

$q(r, j, t) = -rh \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - q_0(r, j, t) + q_p(r, j, t)$ – интенсивность нормальной нагрузки,

где r – плотность материала; $q_0(r, j, t)$ – интенсивность диссипативных сил; $q_p(r, j, t)$ – интенсивность возбуждающей нагрузки.

Уравнение движения срединной поверхности рассматриваемой круглой пластины представляет собой такую зависимость:

$$\nabla^2 \nabla^2 x + \frac{12r(1-m^2)}{Eh^2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{24rn(1-m^2)}{Eh^2} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{D} q(r, j, t). \tag{3}$$

Определение сил трения – сложная техническая задача, требующая дополнительных экспериментальных исследований по определению вязкой и амплитудно-зависимой составляющих коэффициента трения и их учету в дальнейших расчетах. Такие расчеты выходят за рамки поставленных в этом исследовании задач. Поэтому для решения уравнения (3) предложено такое:

1) так как при резонансных колебаниях формы колебаний близки к формам собственных колебаний [12], то амплитуды колебаний для случая гармонического возбуждения приняты в виде функции собственных форм;

2) исследование процессов релаксации остаточных напряжений проведены для различных фиксированных значений максимальной амплитуды перемещений срединной плоскости при колебаниях.

Руководствуясь вышесказанным, предлагается искать решение задачи о вынужденных колебаниях круглой пластины в виде (4):

$$x(r, j, t) = w(r, j) \cdot \sin wt. \tag{4}$$

Для рассмотренного случая круглой пластины, свободно опертой по контуру, граничные условия учтены равенством нулю прогиба и изгибающего момента при $r = R$ (5):

$$\begin{aligned} w|_{r=R} &= 0; \\ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{m}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Из решения полученного уравнения при помощи математического пакета Maple получены значения собственных частот в диске с такими параметрами: $R = 500$ мм, $h = 10$ мм, плотность материала $r = 7,8 \times 10^3$ кг/м³. Значения коэффициентов в уравнении форм выбраны так, чтобы максимальные прогибы в центре диска равнялись 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3 от его толщины.

Радиальные перемещения найдены как функции текущих координат и рассчитанных значений прогибов:

$$u(r, z) = -z \frac{\partial w(r)}{\partial r},$$

где z – текущее значение координаты, отсчитываемое от срединной линии; $w(r)$ – форма прогиба срединной плоскости; ω – частота гармонического возбуждения.

На основании приведенных в [3] зависимостей деформации от радиального перемещения получены выражения для нахождения величин деформации при известных прогибах (6):

$$\begin{aligned} e_r^a(r, z) &= \frac{du^a(r, z)}{dr} = -z \frac{\partial^2 w^a(r)}{\partial r^2}; \\ e_q^a(r, z) &= \frac{u^a(r, z)}{r} = -\frac{z}{r} \frac{\partial w^a(r)}{\partial r}. \end{aligned} \quad (6)$$

На основании закона Гука и полученных зависимостей (6) напряжения, возникающие в процессе колебаний, найдены в виде (7):

$$\begin{aligned} S_r^a(r, z) &= \frac{E}{1-m} (e_r^a + m e_q^a) = -\frac{E}{1-m} \left(z \frac{\partial^2 w^a(r)}{\partial r^2} + m \frac{z}{r} \frac{\partial w^a(r)}{\partial r} \right); \\ S_q^a(r, z) &= \frac{E}{1-m} (e_q^a + m e_r^a) = -\frac{E}{1-m} \left(\frac{z}{r} \frac{\partial w^a(r)}{\partial r} + m z \frac{\partial^2 w^a(r)}{\partial r^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Расчет процесса вибрационного старения.

В связи с тем, что в системе происходят поперечные колебания с амплитудой действующих напряжений S_a , величина остаточных напряжений есть функция не только r , но и z . Вследствие этого приращение элементов тензора остаточной пластической составляющей деформации e_{ij}^p является функцией z и, как следствие, приращение напряжений S_r, S_q также является функцией z :

$$\begin{aligned} S_r^p(r, z) &= \frac{E}{1-m^2} \left(\left[\frac{dS_r^a(r, z)}{dr} + m \frac{S_r^a(r, z)}{r} \right] - S_r^p(r, z) \right); \\ S_q^p(r, z) &= \frac{E}{1-m^2} \left(\left[\frac{dS_q^a(r, z)}{dr} + m \frac{S_q^a(r, z)}{r} \right] - S_q^p(r, z) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

В связи с тем, что в рассматриваемом диске остаточные напряжения на срединной поверхности не равны нулю, условие равновесия записано относительно приращения усилий в срединной плоскости (9) [1]:

$$N_r^p - N_q^p + r \frac{dN_r^p}{dr} = 0, \quad (9)$$

где приращения усилий найдены согласно формулам (10):

$$\begin{aligned} N_r^p &= \int_{-h/2}^{h/2} S_r^p(r, z) dz; \\ N_q^p &= \int_{-h/2}^{h/2} S_q^p(r, z) dz. \end{aligned} \quad (10)$$

Зависимость (9) после подстановки (10) приобрела вид (11):

$$h \left[\frac{d^2 i_0(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d i_0(r)}{dr} - \frac{i_0(r)}{r^2} \right] = - \int_{-h/2}^{h/2} \left[\frac{d S_r^p}{dr} - \frac{S_r^p}{r} - S_q^p \right] dz, \quad (11)$$

где $i_0(r)$ – радиальное перемещение на срединной поверхности; h – толщина диска.

Краевые условия (12):

$$\begin{aligned} r=0; \quad N_r &= N_q; \\ r=R; \quad N_r &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет выполнен при помощи программы, написанной на языке Pascal. Количество точек, в которых производился расчет остаточных напряжений: вдоль радиуса – 100 точек, по толщине диска – 10 точек. Параметры процесса релаксации: $C = 7,79 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $a = 5,57$. При решении уравнения (12) использовался метод конечных разностей.

Выполнение практических расчетов.

Распределение остаточных напряжений описано в [14]. Принято, что зона пластического течения заняла половину радиуса диска, т. е. $r_1 = 0,5R$. Выполнен расчет процесса вибрационного старения при максимальных прогибах в центре диска, равных 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3 от его толщины.

Отмечено, что эпюры остаточных напряжений после релаксации, вычисленные при различных значениях максимальных прогибов во время виброобработки, имеют характерный вид, изображенный на рис. 1. Величина изменения остаточных напряжений пропорциональна величине прогиба, что подтверждает ранее высказанное предположение о зависимости скорости релаксации от амплитудных напряжений.

Дальнейшие расчеты по влиянию формы колебаний выполнены для случая, когда величина максимального прогиба равняется $0,3h$. Полученные эпюры приведены на рис. 2.

Очевидно, что релаксационный процесс эффективнее при обработке с частотой, равной первой резонансной частоте. Это связано с тем, что при колебаниях на первой резонансной частоте отсутствуют узлы колебаний.

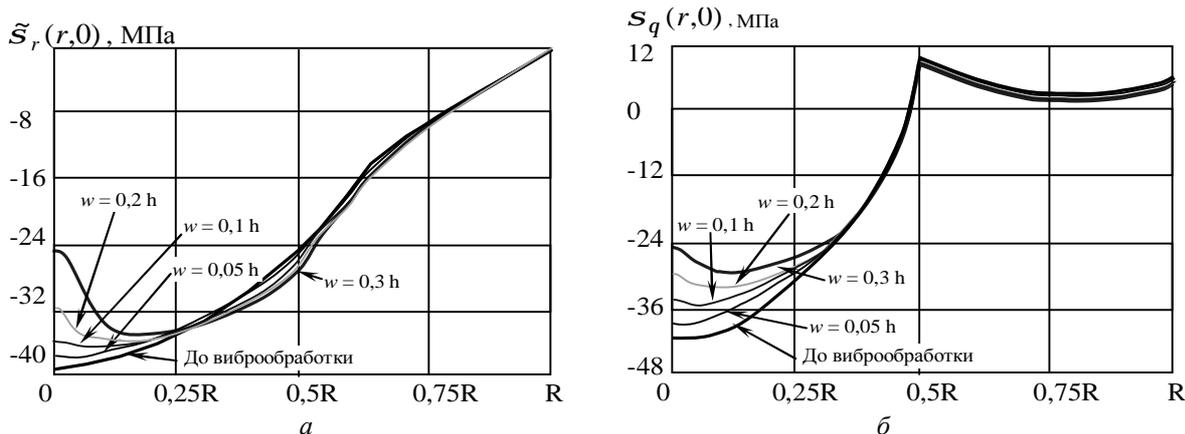


Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений в диске в зависимости от амплитуды:
а – радиальных; б – окружных

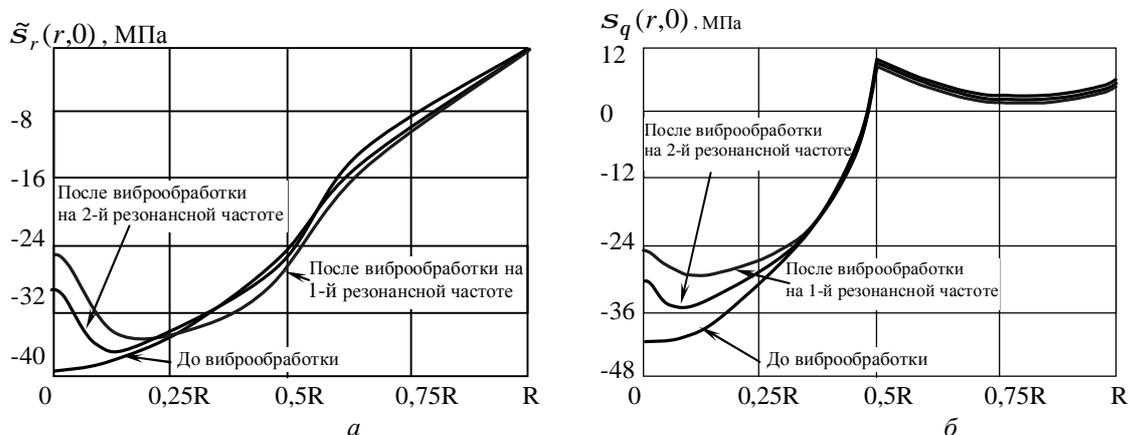


Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений в диске после обработки на различных частотах:
а – радиальных; б – окружных

Скорость процесса релаксации остаточных напряжений прямо пропорциональна расстоянию от нейтральной линии, и вследствие этого наибольшие остаточные напряжения находятся на срединной линии, что можно увидеть при рассмотрении эпюры распределения остаточных напряжений по толщине диска после виброобработки на первой резонансной частоте в сечении, для которого радиус $r = R/10$ (рис. 3).

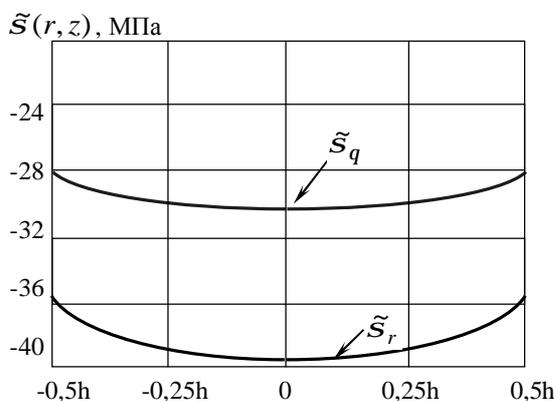


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по толщине диска

Кроме того, сравнив полученное решение с изложенными в [10] результатами вибрационной обработки толстостенной трубы, можно отметить, что процесс релаксации остаточных напряжений идет медленнее за счет того, что на срединной поверхности не происходит приращение элементов тензора остаточной пластической составляющей деформации, описываемых формулами (1).

Выводы. Сформулированы и решены задачи релаксации остаточных напряжений в осесимметричных конструкциях. Созданы математические модели процесса вибрационного старения толстостенной трубы и сплошной круглой пластины постоянной толщины. Получены численные решения сформулированных задач. Построены эпюры внутренних напряжений до и после вибрационной обработки. Проанализированы полученные зависимости.

1. Рагульскис К.М., Вибрационное старение / К.М. Рагульскис, Б.Б. Стульпинас, К.Б. Толутис. – Л.: Машиностроение. 1987. – 72 с. 2. Munsif A.S.M.Y. Use of static stress for modification of welding residual stresses/A.S.M.Y. Munsif, A.J. Waddell, C.A. Walker// Science and Technology of Welding and Joining. – 2002. – Vol. 7 №.1. – P. 51-55. 3. Sun M.C. Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel/ M.C. Sun, Y.H. Sun, R.K. Wang //Materials Letters. –2004. – Vol. 58, № 7–8. – P. 1396–1399. 4. Полнов В.Г. Влияние собственных колебаний сварных конструкций на устранение в них остаточных напряжений вибрацией / В.Г. Полнов, В.М. Сагалевич, М.Н. Могильнер // Сварочное производство. – 1988. – № 4. – С. 37–39. 5. Кузнецов Е.В. Разработка и внедрение вибрационной технологии для получения прецизионных изделий машиностроения: дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Кузнецов Евгений Викторович. – Днепропетровск, 1996. – 154 с. 6. Колот А.В. Повышение надежности технологии вибростабилизирующей обработки на основе оптимизации ее режимов: дис. канд. техн. наук: 05.03.08 / Колот Александр Владимирович – К., 1997. – 166 с. 7. 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. 8. Жидков А.Б. Теоретическое обоснование выбора режима виброобработки ответственных металлоконструкций / А.Б. Жидков // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури: Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених,

аспірантів і студентів. – Макіївка: ДоНАБА, 2009. – № 5 (79). – С. 32–34. 9. Жидков А.Б. Исследование процессов, происходящих в сварных конструкциях при виброобработке на имитационных моделях / А.Б. Жидков, В.А. Сысоев // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – № 2 (19). – С. 106–111. 10. 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. 11. Огибалов П. М. Изгиб, устойчивость и колебания пластинок / П. М. Огибалов. – М.: МГУ, 1956. – 388 с. 12. Бидерман В. Л. Прикладная теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1970. – 416 с. 13. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1961. – 538 с. 14. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1967. – 400 с.

УДК 621.73

І.А. ДУДНІКОВ

Полтавська державна аграрна академія

ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ПІД ЧАС ДЕФОРМУВАННЯ

© Дудніков І.А., 2011

Розглянуто основні показники оцінки пластичності металів поверхневого шару деталей при їх відновленні різними методами.

The basic evaluation indexes of plasticity of metals of superficial layer of details are examined at their renewal different methods.

Постановка проблеми. Покращення якості деталей під час їх виготовлення або відновлення пов'язано, великою мірою, з інтенсифікацією використаних технологічних процесів обробки поверхневого шару. Дати оцінку деформуванню металу в холодному стані, визначити величину зусиль та деформацій, розрахувати напруження, що при цьому виникають, можливо тільки тоді, коли відомі залежності його механічних властивостей від структури, механічних параметрів, хімічного складу тощо.

Розроблення достовірних методів оцінки пластичності матеріалу деталей, які давали б можливість повніше враховувати вплив методу навантаження і схеми напруженого стану на пластичність металів, залишається актуальною науковою проблемою теорії деформування.

Аналіз останніх досліджень. Методи оцінки деформування металів тиском ґрунтуються на теорії деформування, яка враховує вплив навантаження на інтенсивність накопичення пошкоджень і дає змогу отримати кількісну оцінку впливу параметрів технологічного процесу на ймовірність руйнування.

Інтенсивність утворення мікропор металу можна значно знизити за рахунок зміни характеру навантажень, наприклад, при знакозмінних деформаціях [1–3].

У роботах [4, 5] встановлено, що дефекти, які утворюються, погіршують фізико-механічні характеристики виробів, а також знижують їхні експлуатаційні характеристики. Це свідчить про актуальність проблеми визначення ресурсу пластичності не тільки з погляду якості поверхні