

УДК 621.789

Т. А. Балтаев, магистр техники и технологии, старший преподаватель кафедры «НГД и ТМС»
Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, г. Уральск, РК

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ПРОЦЕССЕ
РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРУГЛЫХ УПРУГИХ
ПЛАСТИНАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Аннотация

Эффективность тренировки приборов, имеющих в качестве чувствительного элемента круглую металлическую пластину, можно существенно повысить, если использовать ультразвуковой способ стабилизации пластины, обеспечивающий высокую частоту колебаний пластины, а, следовательно, снижение время тренировки, при котором обеспечивается потребное число циклов нагружения $i = f \cdot \tau$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России – Задание № 9.896.2014/К на выполнение НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Ключевые слова: упругий чувствительных элемент, мембрана, стабилизация, релаксация остаточных напряжений.

Круглые упругие пластины широко применяют в различных автоматических устройствах и приборах, основанных на измерении давления жидкости или газов и приводящих в действие в зависимости от величины этого давления исполнительные механизмы. Важным требованием к этим пластинам является отсутствие в ее материале остаточных напряжений, так как остаточные напряжения не обеспечивают стабильные упругие свойства пластины, что приводит к существенной погрешности устройств.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к таким изделиям является точное соответствие величины деформации пластины и измеряемого давления среды. Это соответствие не всегда обеспечивается из-за возникающего явления упругого статического гистерезиса, в результате которого часть затраченной на деформацию пластины энергии поглощается материалом пластины и образуется, так называемая, петля гистерезиса. Это и приводит к существенной потере точности измерительных приборов.

При разработке математической модели процесса упругой деформации пластины с учетом явления гистерезиса, как правило принимают следующие допущения:

1. Толщина пластины

$$\delta < \frac{d}{3}, \text{ м}, \quad (1)$$

где d - диаметр пластины, м.

2. Максимальный прогиб пластины

$$\lambda \leq \frac{\delta}{5}, \quad (2)$$

где δ - толщина пластины, м.

3. Напряжения в пластине не превышают предела упругости ее материала.
4. Пластина жестко закреплена по периметру, а внешняя нагрузка распределена по площади окружности, находящейся в центре пластины, так что

$$q = \frac{4P}{\pi \cdot d^2}, \quad (3)$$

где d - диаметр пластины, м;
 P - внешняя нагрузка, Н;

q - равномерно распределенные по поверхности пластины напряжения, Н/м².

5. Потери энергии, возникающие при деформации пластины прямо пропорциональны потенциальной энергии деформации пластины, возникшей за счет наличия в материале пластины внутренних дефектов в виде межзеренных и межфазных пластических сдвигов и движения дислокаций в процессе изготовления, и обратно пропорциональны, так называемой энергии насыщения материала пластины, при которой пластическая деформация по границам зерен охватывает весь объем материала. Это положение вытекает из принципа самоорганизации термодинамической системы, которая заключается в том, что система образует структуру, т.е «определенным образом располагает свои энергосодержащие элементы, чтобы при минимуме запасенной (диссипированной) энергии уравновесить внешние возмущения». Обоснование этого положения содержится в работах Г. Гельмгольца и развито в работах профессора Н.Г. Колбасникова [1].

Сущность ультразвуковой релаксации остаточных напряжений в круглых пластинах заключается в том, что к пластине по ее центру прикладывают инструмент, находящийся под определенной внешней нагрузкой, и сообщают инструменту ультразвуковые колебания. Для эффективного осуществления процесса ультразвуковой стабилизации необходимо выбрать мощность колебательной системы, амплитуду, частоту колебаний и время обработки в зависимости от геометрических, упругих параметров пластины и способа ее закрепления в корпусе устройства. Причем задачей обработки является не только удаление напряжений в центре пластины, но и на других ее участках.

Ниже приведены основные этапы процесса выбора рациональных условий стабилизации:

1. Формулировка задач ультразвуковой вибромеханической обработки.

Оптимизация условий вибромеханической обработки – это поиск такого варианта осуществления процесса стабилизации, при котором обеспечиваются заданные показатели качества при минимуме материальных и трудовых затрат.

Для круглых пластин, которые обычно используются в приборостроении, основным показателем качества является стабильность упругих деформаций под действием внешней нагрузки, которая обеспечивается удалением остаточных напряжений и тем самым обеспечивает устранение гистерезисных потерь.

2. Обоснование критерия определения рациональных условий.

Наиболее универсальными критериями вибромеханической стабилизации, как и любого технологического процесса, являются экономические критерии, т.к. они учитывают затраты как живого, так и овеществленного труда. В ряде случаев, когда экономические критерии зависят только от производительности изготовления изделий (при неизменном оборудовании, инструменте и прочих накладных расходах), выбор рациональных условий вибромеханической стабилизации можно осуществлять по критерию обеспечения максимальной производительности обработки. В таком случае в качестве параметров оптимизации следует использовать такие, которые влияют на основное время обработки, например, частота вибраций, подача инструмента, величина деформации детали, вызываемые в материале детали изгибающий момент, изгибающие напряжения.

3. Выявление статистических параметров, характеризующих исходное состояние детали.

Например, чтобы устранить остаточные напряжения, необходимо изучить наличие остаточных напряжений в деталях. Остаточные напряжения можно замерить. Но эти методы

требуют наличия дорогостоящих приборов. Поэтому в лабораторных условиях мы рекомендуем определять их косвенным способом путем определения гистерезисных потерь при деформации детали, нагруженной до возникновения в ней напряжений, близких к пределу упругости. Для этого необходимо с высокой точностью измерить остаточную деформацию детали после снятия внешней нагрузки, а затем по формулам сопротивления материалов определить величину остаточных напряжений. При этом для изучения исходного состояния детали надо сформировать небольшую выборку деталей (3-5 штук), взятых из партии деталей случайным образом, чтобы эта группа отражала состояние деталей всей партии (была репрезентативной) и определить среднее и среднее квадратическое значения остаточной деформации. Это позволит при оптимизации режима обработки ориентироваться на максимально возможные значения остаточных напряжений.

4. Математическое моделирование потенциальной энергии образования остаточных напряжений в детали.

Конечно, маловероятно изучить все этапы образования остаточных напряжений в деталях, начиная с получения исходного проката, штамповки или отливки и кончая заключительными операциями механической обработки деталей. Поэтому все эти этапы образования остаточных напряжений следует заменить моделированием процесса деформации детали, приводящим к тем же остаточным напряжениям, которые имеют место в материале детали. Заключительным этапом расчета является определение суммарной энергии e_{ps} , затрачиваемой на образование остаточных напряжений и остаточной потенциальной энергии e_p деформации детали. Энергия складывается из четырех составляющих: энергии упругой деформации, создаваемой упругим изгибающим моментом и действием упругих поперечных сил на участке упругой деформации, и энергии, возникающей от действия изгибающего момента и поперечных сил на участке пластической деформации. Действием поперечных сил можно пренебречь, так как энергия деформации, вызванная этими силами, на порядок и больше меньше энергии, вызванной изгибающим моментом.

5. Моделирование процесса релаксации остаточных напряжений в детали.

Для моделирования релаксации остаточных напряжений необходимо, прежде всего, определить применяемый способ вибромеханической обработки. Среди многочисленных способов релаксации остаточных напряжений мы предлагаем наиболее эффективный с точки зрения обеспечения максимальной производительности и максимального обеспечения качества способ наложения на круговую пластину под определенной нагрузкой ультразвуковых колебаний. Используя принятую схему обработки строим математическую модель удельных затрат энергии деформации $e(\sigma_r, \tau)$ кольцевого участка пластины элементарной ширины dr в зависимости от напряжений, возникающих на кольцевом участке пластины радиусом r , и времени обработки τ . Величину r выбираем из условия, что на всей площади окружности радиуса r остаточные напряжения круговой пластины должны стремиться к нулю.

Другим способом построения математической модели может быть математическое моделирование результатов экспериментальных исследований.

6. Выбор рациональных условий обработки.

Выполненное моделирование режима обработки позволяет выбрать рациональные параметры вибромеханической стабилизации. Для этого необходимо построить математическую модель процесса путем ввода соответствующих ограничений и построения целевой функции.

Любая оптимизация строится на противоречиях. Противоречивыми факторами при ультразвуковой релаксации остаточных напряжений являются напряжения σ_0 , возникающие на наиболее нагруженном участке пластины (в ее центре), и затрачиваемая мощность на осуществление процесса. С одной стороны, с увеличением σ_0 время обработки уменьшается, так как процесс обработки идет более интенсивно. С другой стороны, при возрастании σ_0 требуется более мощная ультразвуковая система. Но даже при неограниченной мощности ультразвуковой системы мощность обработки ограничивается

допустимым тепловыделением, которое может привести к неблагоприятным структурным превращениям материала пластины [2-5].

Таким образом, оптимизация режима обработки заключается в следующем: Исходя из условия

$$k\sigma_u \geq \sigma_o \geq 0,5\sigma_u, \quad (4)$$

где σ_o - напряжение, возникающее под действием внешней нагрузки на наиболее нагруженном участке пластины; σ_u - предел упругости материала пластины; k - коэффициент запаса, равный $k = 0,8 - 0,9$, выбирается значение внешней нагрузки на пластину $P(\sigma_o)$. Указанная нагрузка необходима, чтобы в случае возникновения резонанса амплитуда колебаний оставалась в допустимых пределах, препятствующих разрушению пластины.

Устанавливается максимально возможная для данной ультразвуковой системы амплитуда колебаний инструмента A .

Далее определяется допустимая мощность ультразвуковой обработки $N(f, K_g, A)$, которая, как известно, зависит от частоты колебаний инструмента f (Гц), податливости пластины K_g (мм/Н) и амплитуды колебаний инструмента A (мм):

$$N(f, K_g, A) = \frac{2 \cdot 10^{-3} A^2}{K_g} f \text{ (Вт)}. \quad (5)$$

В течение 5-10 секунд при различной мощности осуществляется обработка 3-4-х деталей и замеряется температура пластины. Мощность регулируется либо частотой колебаний, либо амплитудой, что более целесообразно, так как она более значительно влияет на мощность. За предельно допустимое значение мощности принимают такое, при котором температура в течение указанного времени, соответствующего установившемуся режиму обработки, повысилась не более чем на 30 градусов.

Затем по формуле:

$$\tau = \frac{\ln \sigma_{kr}(r) - \ln \sigma_u(r)}{f \cdot \ln \left(1 - \frac{e_T(r)}{e_n} \right)} \quad (6)$$

где $e_T(r)$ - удельная энергия, затрачиваемая за один период колебаний инструмента на радиусе r , Дж/мм;

e_n - удельная энергия насыщения материала, при которой начинается разрушением материала, Дж/мм;

$\sigma_u(r)$ - исходное значение напряжений, действующих в пластине на радиусе r , МПа;

$\sigma_k(r)$ - допустимое остаточное напряжение, действующее в пластине на радиусе r , МПа.

При необходимости можно решить обратную задачу – при заданном времени обработки τ определить величину остаточных напряжений на кольцевом участке радиуса r :

$$\sigma_k(r) = \sigma_u(r) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_T(r)}{\sigma_p} \right)^{f \cdot \tau}. \quad (7)$$

По аналогии, предложенную методику оптимизации режима обработки можно использовать для других способов вибромеханической стабилизации [6-8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Сопротивление деформации и пластичность / Н.Г. Колбасников. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 314 с.
- 2 Балтаев Т.А. Математическая модель ультразвукового поверхностного упрочнения [Текст] / Т.А. Балтаев, А. С. Носков, А.В. Королев // Научно – практический журнал Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана «Наука и образование». ISSN 2305-9397. – 2012. – №4 (29). – С. 117-120.
- 3 Балтаев Т.А. Сравнительный анализ ультразвукового и термического методов релаксации остаточных напряжений [Текст] / Т.А. Балтаев, А.В. Королев, А.Ф. Балаев, С.А.Савран, А.С. Яковишин // Наука, технологии в современном мире: материалы II Международной научно-практической конференции (Уфа, 30 – 31 июля 2015 г.). – Уфа: РИО ИЦИПТ, 2015. – С. 47 – 50.
- 4 Балтаев Т.А. Современные тенденции в развитии оборудования и приборов для снятия и контроля остаточных напряжений [Текст] / Т.А. Балтаев, А.В. Королев, А.А. Королев, А.Ф. Балаев, С.А. Савран, Е.В. Мухина, Б.Т. Шакешев, К.А. Нариков, Б.Н. Салимов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – №. 3. – С. 42-46.
- 5 Zhang J. Residual stresses in welded moment frames and implications for structural performance / J. Zhang, P. Dong // J. Struct. Engrg. – 2000. – Vol. 126, Issue 3. – P. 306–315.
- 6 Ham J. Surface hardening of high speed steel by carbide laser treatment /Ham J., David Q. Payne // Proceeding of the International Conference on Production Engineering. - Tokyo, 1974. -P.13-19.
- 7 Королев А.В., Королев А.А. Способ релаксации остаточных напряжений // Патент RU № 2478031. 27.05.2011. Бюл. №2
- 8 Королев А.В., Чистяков А.М., Кривега В.А., Моисеев Г.Н. Способ вибростарения деталей // Патент РФ № 2140842. 20.03.99. Бюл. №8.

ТҮЙІН

Бұл жұмыста ультрадыбыстық энергияны қолдануға негізделген технологиялардың авторлар әзірлеген және зерттеген салыстырмалы тиімділігінің нәтижелері ұсынылған.

Зерттеу нәтижесінде, ультрадыбыстық энергияны қолданудың айқын тиімділігі, тек машина жасау өндірісіндегі бұйымдардың геометриялық параметрлерін тұрақтандыру үдерісінде ғана емес, сондай-ақ қалдық кернеулерді тұрақтандыру процесінде жеке бөлшектер мен құрама бөлшектегі тетік түйіндері ретінде, оны қолдану мүмкіндігі анықталды. Ұсынылған технологияның техникалық және экономикалық тиімділігі келесілермен шартталған: өңдеу қуатын қамтамасыз ету және жоғары сапалы өңдеу кезінде, бұл әдіс бөлшектердің қалдық деформациясы болмауын, оның сыртқы бетіне зақым келмеуін және геометриялық параметрлерін тұрақтандыруды қамтамасыз ету үшін ультрадыбыстық тербелістердің энергиясын максималды пайдалануын қамтамасыз етеді. Авторлармен зерттелген технология қалдық кернеулерді тұрақтандыратын дәстүрлі технологияларға қарағанда, келтірілген өңдеу шарттары үшін машина уақытын қысқарту арқылы өнімділігін ұлғайту жолымен бөлшектерді дайындаудың өзіндік құнын төмендетеді.

RESUME

This article presents the results of comparative efficiency of the developed and of technologies, studied by the authors, based on the application of ultrasonic energy.

As a result of research, it is revealed the obvious effectiveness of application ultrasound energy not only in the process of stabilization of the geometric parameters of products of mechanical engineering production, but also the possibility of its application in the process of stabilization of residual stresses, as individual parts, and also machinery components in assembly unit of mechanisms. Technical and economic efficiency of the proposed technology is conditioned by: providing processing productivity, at high quality processing of this method ensures that no residual strain parts, damage to its outer surface, and the maximum use of energy ultrasonic vibrations to ensure the stabilization of geometrical parameters. The technology reduces the cost of manufacturing parts by increasing productivity while reducing machine time to set conditions regarding the processing of traditional technologies of stabilization of residual stresses.