

ка во фреоновых композициях. – М: Машиностроение, 1978. – 48 с.

3. Келлер, О.К. Ультразвуковые генераторы на транзисторах и тиристорах. – М.: Машиностроение, 1979. – 47 с.

4. А.с. 850231 СССР МКИ В 06 В 1/06. Ультразвуковая установка / И.В. Петушко, Ю.В. Холопов (СССР). – № 2799800/18-10; заявл. 20.07.79; опубл. 30.07.81, Бюл. № 28.

5. Петушко, И.В. Оборудование для ультразвуковой очистки. – СПб: «Андреевский издательский дом», 2004. – 150 с.

6. Ланин, В.Л., Томаль, В.С. Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 8. Режим доступа свободный. http://tech-e.ru/2007_8_60.php

7. Ланин, В.Л., Томаль, В.С. Ультразвуковая очистка микрорельефных поверхностей оптоэлектронных изделий // Фотоника. – 2007. – № 4. – С. 35–40.

8. Fuchs F.J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion. Precision Cleaning. 1995, № 3 (10), pp. 13-17.

9. Бреславец, А.В., Хуторненко, В.Д. Ультразвуковая очистка радиоаппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 80 с.

10. Ультразвуковая очистка РЭА и приборов / М.Д. Тявловский, Е.П. Фастовец, В.М. Алефиренко; под ред. А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1984. – 239 с.

REFERENCES

1. Savage T. Ultrasonic Cleaning in Industry. Wire Industry. 2006, № 6, pp. 424–426.

2. Bronin, F.A., Chernov, A.P. *Ultrasonic Cleaning in Freon Compositions*. – М: Mechanical Engineering, 1978. – 48 с.

3. Keller, O.K. *Ultrasonic Generators on Transistors and Thyristors*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 47.

4. Author's certificate 850231 USSR ICI B 06 B 1/06. Ultrasonic Plant / I.V. Petushko, Yu.V. Kholopov (USSR). – № 2799800/18-10; applied. 20.07.79; published 30.07.81, Bulletin № 28.

5. Petushko, I.V. *Equipment for Ultrasonic Cleaning*. – S-Pb: “Andrey Publishing House”, 2004. – pp. 150.

6. Lanin, V.L., Tomal, V.S. Technology and equipment of ultrasonic cleaning of electronics // *Electronics Technologies*. – 2007. – № 8. Free access mode. http://tech-e.ru/2007_8_60.php

7. Lanin, V.L., Tomal, V.S. Ultrasonic cleaning of micro-relief surfaces in optoelectronic products // *Photonics*. – 2007. – № 4. – pp. 35–40.

8. Fuchs F.J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion. Precision Cleaning. 1995, № 3 (10), pp. 13-17.

9. Breslavets, A.V., Khutornenko, V.D. Ultrasonic cleaning radio equipment. – М.: *Soviet Radio*, 1974. – pp. 80.

10. Ultrasonic Cleaning of Radio Electronic Equipment and Appliances / M.D. Tyavlovsky, E.P. Fastovets, V.M. Alefirenko; under the editorship of A.V. Stepanenko. – Minsk: *Science and Engineering*, 1984. – pp. 239.

Рецензент д.т.н. Д.И. Фатюхин

УДК 621.789

DOI: 10.12737/24546

А.В. Королев, д.т.н.,

А.Ф. Балаев, к.т.н.,

Т.А. Балтаев, аспирант

(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: bandrey.sc@gmail.com

Технология ультразвуковой стабилизации геометрических параметров упругих пластин

Описана технология стабилизации геометрических параметров упругих пластин на основе релаксации остаточных напряжений под действием ультразвуковых колебаний. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде графиков зависимостей остаточной деформации от технологических факторов.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания; технология; остаточная деформация; стабилизация.

Ultrasonic stabilization technology of geometrical parameters of elastic plates

The paper reports the substantiation of the stabilization technology for geometrical parameters of elastic plates in pressure sensors carried out by means of residual stresses affected by ultrasonic oscillations. For the confirmation of the efficiency of the developed ultrasonic stabilization technology in accordance with the procedure described the experimental investigations are carried out. The results of the experimental study are presented by the equation of regression and diagrams of residual stresses dependences upon technological factors. Amplitudes of ultrasonic oscillations, a static force of tool pressure and machining duration were assumed as variable technological factors. High productivity and efficiency of the ultrasonic technology for elastic plate stabilization are proved experimentally. As a result of the experiment there are defined rational values of ultrasonic processing modes for specific geometrical and physical-mechanical parameters of a plate.

Keywords: ultrasonic oscillations; technology; residual deformation; stabilization.

Упругие чувствительные элементы типа круглых пластин являются одним из наиболее ответственных элементов датчиков давления, применяемых в контрольно-измерительных приборах. От качества упругих элементов зависит точность показаний приборов, поэтому к обеспечению стабильности механических параметров этих элементов на протяжении всего периода эксплуатации предъявляются повышенные требования.

В ходе эксплуатации упругие элементы подвергаются многократным деформациям, что приводит к накоплению остаточных деформаций, оказывающих влияние на точность показаний измерительного прибора в процессе эксплуатации датчика давления. Причина этого заключается в возникновении деформации пластины под действием внутренних остаточных напряжений вследствие пластической ползучести материала.

Для исключения данного явления в режиме эксплуатации, круглые пластины подвергаются операции стабилизации, представляющей собой «тренировку» при которой равномерно распределенная циклическая нагрузка действует на круглую пластину под действием жидкости или газа, эмитируя реальную работу прибора.

В результате такого многоциклового нагружения упругой пластины в течение нескольких часов сначала при отрицательной температуре, затем при повышенной температуре происходит релаксация остаточных напряжений. Однако такая технология имеет низкую производительность и не всегда обеспечивает полное снятие остаточных напряжений, что приводит к снижению точности показаний приборов.

Данная проблема может быть решена путем применения энергии ультразвуковых колебаний для сокращения времени многоциклового нагружения, что подтверждено работами [1–2]. Согласно результатам исследований, представленных в этих работах, при использовании ультразвукового метода релаксации происходит существенное сокращение затрат времени и энергии при более стабильных результатах по геометрическим параметрам изделий в сравнении с термическими методами [3]. Однако остается открытым вопрос о возможности эффективного применения ультразвуковой обработки для стабилизации накопленной деформации в деталях типа круглых пластин, применяемых в качестве упругих чувствительных элементах в датчиках давления.

Поэтому с целью повышения производительности и качества релаксации остаточных напряжений был разработан способ ультразвуковой стабилизации упругих пластин [4]. Для расчетов технологических режимов ультразвукового способа было разработано математическое описание механизма ультразвуковой релаксации остаточных напряжений в упругих пластинах и проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность математического описания.

Методика эксперимента

В качестве объекта экспериментальных исследований были отобраны 24 круглые пластины, применяемые в качестве чувствительного элемента в датчиках контроля избыточного давления типа МД – ТП. Датчики производятся на ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева (г. Энгельс), которое специализируется на разработке, производстве и ремонте датчиков

давления. Круглые пластины изготовлены из стали 20X13 ГОСТ 5632-72, закаленной до твердости 48...50 HRC, и прошли все технологические операции предшествующие стабилизации. Диаметр круглой пластины $d = 29$ мм, толщина $h = 0,5$ мм.

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

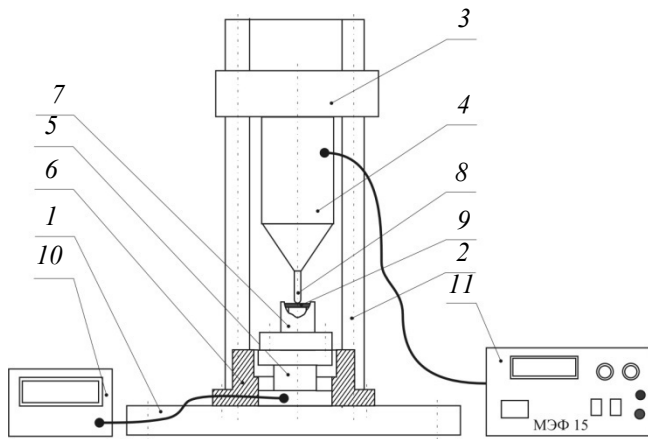


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – стол (станина); 2 – вертикальная направляющая; 3 – хомут; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – тензометрический элемент; 6 – переходник; 7 – датчик давления; 8 – инструмент (индентор); 9 – круглая пластина; 10 – цифровой индикатор; 11 – ультразвуковой генератор

Сверху на станине установлена вертикальная направляющая 2, вдоль которой свободно перемещается подвижный хомут 3 с жестко сопряженным пьезокерамическим ультразвуковым преобразователем 4. К рабочему столу 1 крепится измерительный тензометрический элемент 5 для контроля создаваемой статической силы P прижима инструмента. С помощью переходника 6 датчик давления 7 устанавливается на измерительный тензометрический элемент 5.

На конце ультразвукового преобразователя 4, в цапфе с помощью болтового соединения, закреплен инструмент 8 в виде наконечника со сферическим торцом из материала ВК-8 (ГОСТ 3882-74). Ультразвуковой преобразователь 4 при перемещении подвижного хомута 3 по вертикальной направляющей 2 имеет возможность прижима к обрабатываемой поверхности круглой пластины 9. Сила прижима контролируется в реальном времени измерительным тензометрическим элементом 5 по показаниям цифрового индикатора 10. Ультразвуковой преобразователь 4 подключен к ультразвуковому генератору

«МЭФ 15» 11.

Для оценки влияния технологических факторов на показатели качества процесса релаксации остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров был применен полный факторный эксперимент.

В качестве наиболее значимых независимых технологических факторов выбраны: статическая сила прижима наконечника к обрабатываемой поверхности пластины P , Н; время обработки t , с; амплитуда колебаний ультразвукового инструмента A , мкм. В качестве контролируемого параметра выбрана величина остаточной деформации круглой пластины Δ_0 , мкм. Частота ультразвуковых колебаний индентора на протяжении всего эксперимента не изменялась и составляла 20 кГц.

Нагрузка на пластину контролировалась тензодатчиком, на который устанавливалось приспособление с закрепленной в нем пластиной, амплитуда колебаний инструмента и пластины измерялась с помощью специального приспособления, в котором закреплялся индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм. Остаточная деформация после ультразвуковой обработки замерялась путем определения расстояния центра пластины от базовой поверхности оправки, в которой закреплялась пластина, до и после обработки.

Результаты эксперимента

По результатам проведенного эксперимента была получена регрессионная степенная зависимость остаточной деформации круглой пластины Δ_0 от трех технологических факторов:

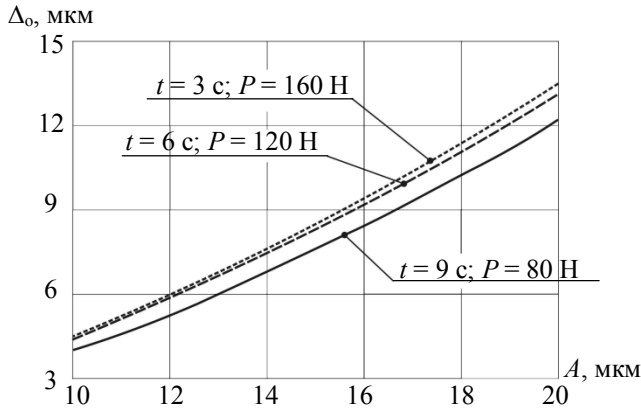
$$\Delta_0 = 1,34 \cdot 10^3 \cdot t^{0,12} \cdot A^{1,65} \cdot P^{0,34}, \quad (1)$$

где Δ_0 – накопленная остаточная деформация круглой пластины, мкм; t – время обработки, с; A – амплитуда ультразвуковых колебаний индентора, мкм; P – статическая нагрузка на пластину, Н.

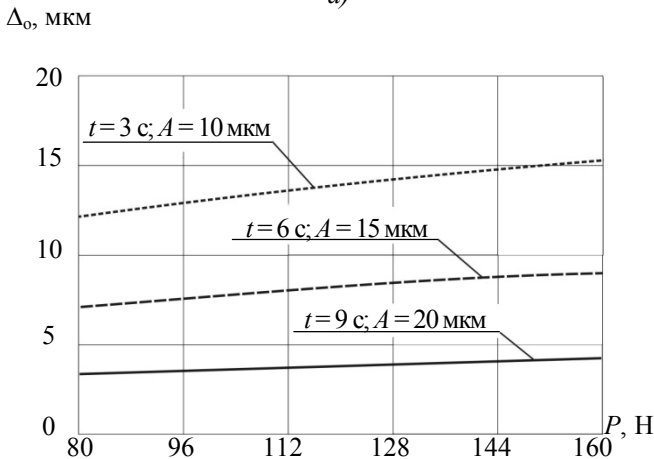
Проверка значимости коэффициентов зависимости проводилась на основе критерия Стьюдента. Проверка адекватности всей модели производилась с помощью критерия Фишера.

В графическом виде результаты эксперимента представлены на рис. 2, где показаны зависимости величины остаточной деформации пластины Δ_0 от амплитуды A колебаний ультразвукового инструмента, силы прижима инструмента к обрабатываемой пластине P и

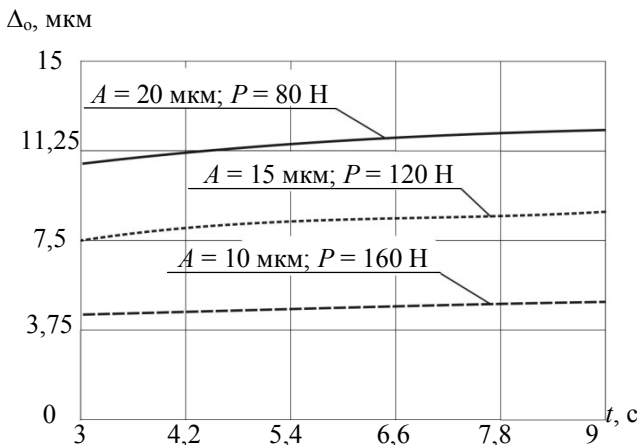
времени обработки t .



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимость остаточной деформации пластины $\Delta_0(t, A, P)$:

а – от амплитуды колебаний A ; б – внешней нагрузки P ; в – времени обработки t

Из графиков видно, что основное влияние на накопленную остаточную деформацию пластины оказывает амплитуда колебаний ультразвукового инструмента (рис. 2, а). Чем меньше амплитуда колебаний, тем меньше

накопленная деформация и тем выше точность обработки. Но при этом требуется больше времени на стабилизацию деформации круговой пластины.

Основная деформация пластины происходит в начальном интервале времени обработки в диапазоне 1...3 с, после чего изменение замедляется (рис. 2, в). При увеличении внешней нагрузки величина остаточной деформации круговой пластины уменьшается (рис. 2, б) и уменьшается потребное время обработки. Поэтому этот фактор является важным при выборе рациональных режимов обработки.

С помощью полученной методики были вычислены рациональные значения режимов ультразвуковой обработки для рассматриваемой пластины: $t = 60 \text{ с}$; $A = 10 \text{ мкм}$; $P = 60 \text{ H}$.

По результатам экспериментальных исследований установлена зависимость величины остаточных деформаций круглых упругих пластин датчиков давления от технологических факторов, подтверждающая адекватность теоретической модели ультразвуковой стабилизации.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить связь между технологическими режимами ультразвуковой стабилизации упругих круглых пластин, применяемых в датчиках давления, и величиной остаточных деформаций. На основе полученных по результатам эксперимента графиков (см. рис. 2) и эмпирической зависимости (1) можно заключить, что среди рассмотренных технологических факторов амплитуда колебаний оказывает наибольшее влияние на величину остаточных деформаций.

При этом наиболее интенсивный рост деформации пластины происходит первые три секунды ультразвуковой стабилизации, после чего процесс замедляется. Данный факт подтверждает высокую производительность и эффективность ультразвукового способа по отношению к традиционному способу «тренировки» пластин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биронт, В.С., Суших, В.А. Южакова, Е.В., Фофанова, А.С., Байдина, Т.В. Релаксация остаточных напряжений при ультразвуковой обработке // Материаловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – №6. – С. 57– 60.

2. Королев, А.В., Болкунов, В.В., Слесарев, С.В., Королев, А.А. Ультразвуковая стабилизация размеров колец подшипников с пластмассовыми ребордами // СТИН. – 2006. – № 9. – С. 38–40.

3. Королёв, А.В., Балаев, А.Ф., Савран, С.А., Балтаев, Т.А., Яковичин, А.С. Сравнительный анализ ультразвукового и термического методов релаксации остаточных напряжений // Наука, технологии и инновации в современном мире. – 2015. – № 1 (2). – С. 47–50.

4. Балтаев, Т.А., Королев, А.В., Королев, А.А., Балаев, А.Ф., Савран, С.А. Технология стабилизации остаточных напряжений в упругих чувствительных элементах приборов давления на основе применения ультразвуковой энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

REFERENCES

1. Biront, V.S., Sushchikh, V.A. Yuzhakova, E.V., Fofanova, A.S., Baidina, T.V. Relaxation of residual stresses at

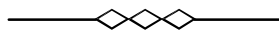
ultrasonic processing // *Material Science and Thermal Metal Treatment*. – 1984. – №6. – pp. 57–60.

2. Korolyov, A.V., Bolkunov, V.V., Slesarev, S.V., Korolyov, A.A. *Ultrasonic Stabilization of Dimensions of Racers with Plastic Bearing Flanges* // STIN. – 2006. – № 9. – pp. 38–40.

3. Korolyov, A.V., Balaev, A.F., Savran, S.A., Baltaev, T.A., Yakovishin, A.S. Comparative analysis of ultrasonic and thermal methods of residual stresses relaxation // *Science, Technologies and Innovations in Modern World*. – 2015. – № 1 (2). – pp. 47–50.

4. Baltaev, T.A., Korolyov, A.V., Korolyov, A.A., Balaev, A.F., Savran, S.A. Technology for residual stresses stabilization in elastic sensitive elements of pressure devices based on ultrasonic energy use // *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Engineering*. – 2015. – № 12. – pp. 39–41.

Рецензент д.т.н. А.Н. Васин



Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru