

УДК 539.3

Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В.

## **ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИН ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ**

**Актуальность темы и постановка задачи.** В современном мире задача защиты от несанкционированного доступа конфиденциальной информации, находящейся в памяти компьютеров, является актуальной. Существует различные способы защиты – пароли, методы доступа, уничтожение информации. Для предотвращения утечки информации наиболее целесообразным представляется ее уничтожение. В последнее время появилось целое семейство устройств, обеспечивающих защиту компьютерной информации от несанкционированного доступа. Все эти устройства стирают информацию с винчестеров при помощи возбуждаемого магнитного поля различного характера: сильного постоянного, импульсного, изменяющего направление, величину и частоту следования импульсов и др. [1, 2]. Однако при воздействии внешним магнитным полем сохраняется возможность восстановления информации винчестера специальными средствами. Кроме того, известные устройства должны иметь мощный источник для возбуждения магнитного поля и значительные габариты. При этом сами винчестеры имеют защиту от внешних электромагнитных полей в виде электропроводящего и ферромагнитного корпуса. Именно поэтому в мировой практике информационной безопасности для полной сохранности рекомендуется физическое повреждение или уничтожение винчестера.

Одним из возможных способов защиты информации является разрушение сквозным пробиванием винчестера, расположенного в корпусе компьютера. Это предъявляет жесткие требования к системе уничтожения информации, так как она должна быть компактна, но при этом обеспечивать достаточное усилие пробивания [3, 4]. Для обеспечения научно обоснованного подхода к проектированию таких устройств защиты информации необходимо решение ряда задач механики твердого деформированного тела. Это задача мгновенного разрушения тонких круглых и прямоугольных пластин для достаточно больших значений силы ударного взаимодействия, малоциклового разрушения для случая, когда не удастся обеспечить требуемое для мгновенного пробивания значение силы, а также весьма важная задача ее идентификации.

Задачи ударного нагружения и разрушения тонкостенных конструктивных элементов привлекают внимание исследователей, начиная со второй половины прошлого века [5]. Их решение было связано с необходимостью обеспечения безопасных условий работы многих ответственных конструктивных элементов космического, авиационного, энергетического, химического и транспортного машиностроения. Исследования удара интенсивно проводятся и в настоящее время [6, 7], так как соответствующие задачи являются одними из наиболее сложных. Они требуют, с одной стороны, использования математического аппарата современного уровня, а с другой стороны – проведения сложных экспериментальных исследований свойств сопротивления удару современных конструкционных материалов.

Настоящая статья посвящена описанию экспериментального комплекса для исследования ударного нагружения тонкостенных конструктивных элементов, разработанного на кафедрах систем и процессов управления и общей электротехники НТУ «ХПИ», методике проведения экспериментов и полученным в них результатам.

### **Описание экспериментального комплекса.**

Задача экспериментальных исследований состояла в изучении разрушения тонких квадратных шарнирно опертых пластин, а также определении характеристик малоциклового ударной усталости материала, из которого они изготовлены.

Для проведения экспериментов был создан информационно-измерительный комплекс, предназначенный для регистрации деформаций при тестировании тонких нагруженных пластин [8]. Комплекс разбит на модули, каждый из которых отвечает за свой участок обработки сигнала: испытательную установку (узел датчиков), блок формирования сигналов датчиков, стабилизированный блок питания комплекса, блок сопряжения и защиты, АЦП ADA-1406 и персональный компьютер.

Испытательная установка состоит из сменного держателя пластины и устройства ударного нагружения. Благодаря замене держателя можно реализовать различные виды закрепления: шарнирное, жесткое, свободное опирание (рис. 1).

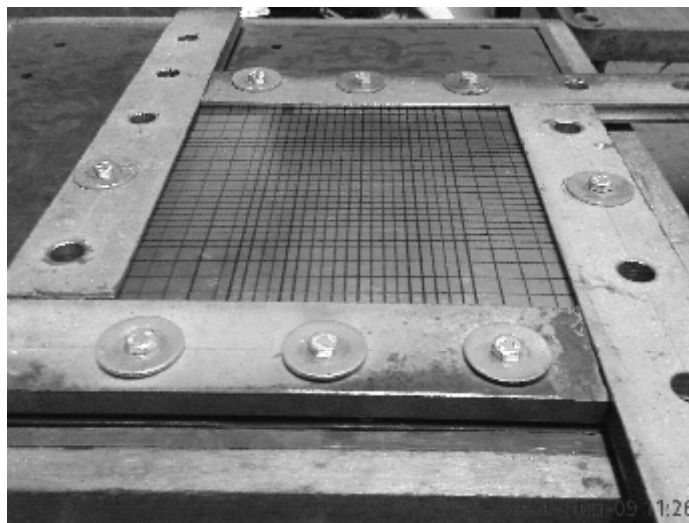


Рисунок 1 - Держатель пластины

Нагружение ударного типа осуществлялось линейным индукционно-динамическим двигателем (ЛИДД) [3]. На рис.2 показаны основные составные части ЛИДД (слева направо):

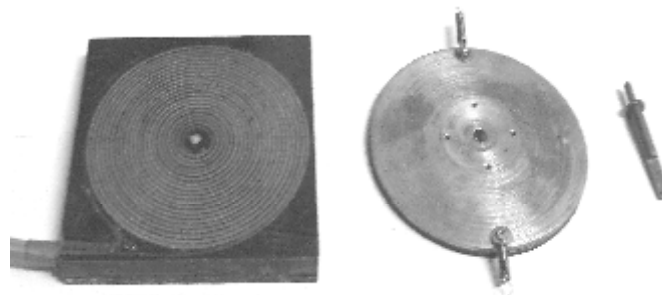


Рисунок 2 - Составные части ЛИДД

- неподвижный индуктор, состоящий из обмотки, замоноличенной эпоксидной смолой в неметаллическом (стеклотекстолитовом) корпусе;
- подвижный дисковый якорь круглой формы (массой 0,43 кг) с двумя пружинами, возвращающими якорь в исходное положение после окончания ударного процесса;
- ударный элемент - боек, ускоряемый якорем и служащий для нанесения механического удара по поверхности исследуемого объекта.

### До обговорення

Якорь состоит из электропроводящего диска, в котором индуцируются вихревые токи, возникающие от импульсного магнитного поля индуктора, и соединенного с ним ударного диска, обеспечивающего передачу электродинамического усилия от электропроводящего диска к бойку.

Индуктор, якорь и ударник крепятся к опорной гетинаксовой плите, установленной на регулируемых опорах, что позволяет изменять начальное расстояние от исследуемой пластины до бойка в диапазоне 0-50 мм, а также угол наклона относительно испытуемой пластины (рис.3). Пластина покрыта измерительной сетью тензодатчиков, объединенных в розетки. Провода от датчиков выводятся сквозь отверстия в плите, которая закреплена на опорной раме.

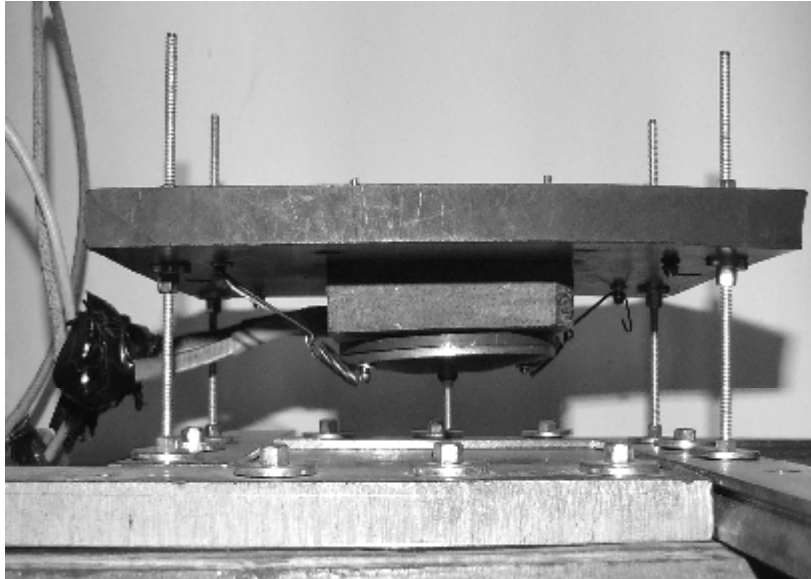


Рисунок 3 – Испытательная установка в сборе

Тензодатчики на испытанной пластине объединены в 5 розеток, по три датчика в каждой (рис. 4). Для измерения сопротивления тензорезисторов применена мостовая схема. Для измерения падения напряжения использовался дифференциальный приемник сигнала.

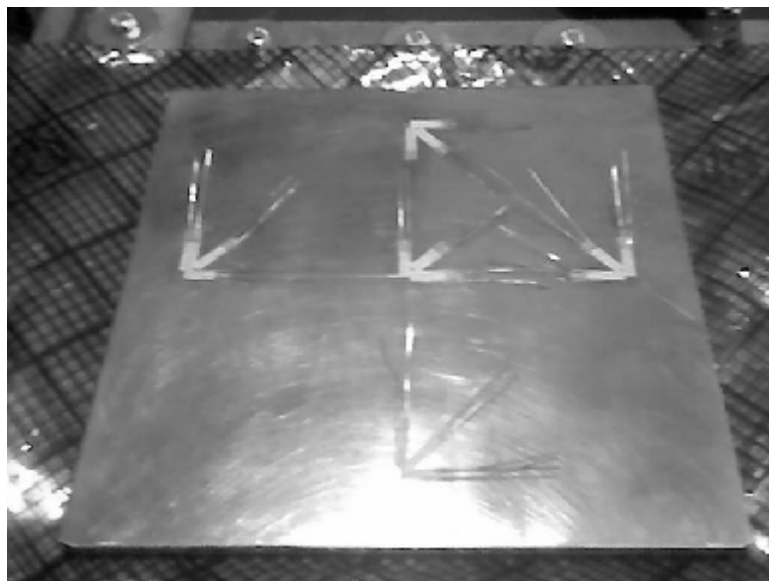


Рисунок 4 – Пластина с датчиками

В качестве приемника в блоке формирования сигналов датчиков применен прецизионный инструментальный усилитель AD623, позволяющий подавлять синфазную помеху, попадающую на вход вместе с полезным сигналом. Цифровые данные, полученные с платы АЦП, поступают в ПК и обрабатываются с помощью специально разработанного программного обеспечения. Оно позволяет записать сигнал, определить значения измеряемых параметров, спектры сигналов, время затухания колебаний. Запуск испытательной установки происходит дистанционно. Одновременно с началом испытаний начинается запись данных.

Важнейшим элементом установки является ЛИДД, работающий в импульсном режиме с кратковременным рабочим циклом и формирующий ударные нагрузки [9]. Поскольку при работе электродвигателя в массивном электропроводящем якоре в каждый момент времени возникает существенная неравномерность распределения индуцированного тока, для расчета электрических процессов используется методика, при которой якорь заменяется совокупностью элементарных короткозамкнутых токовых контуров, а индуктор представляется первичным контуром, подсоединенным к электронной системе возбуждения от емкостного накопителя [10]. В таком случае электрические процессы ЛИДД можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 &R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C_0} \int i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \\
 &\quad \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\
 &R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\
 &\quad + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\
 &\quad \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора;  $i_k, L_k, R_k$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого  $k$ -го контура массивного якоря, перемещающегося со скоростью  $V(t)$  вдоль оси  $z$  относительно индуктора;  $M_{kp}$  - взаимоиндуктивность между  $k$  и  $p$  токовыми элементами двигателя ( $k \neq p$ );  $T_0, T_k$  – температура 0-го и  $k$ -го токовых контуров;  $C, U_0$  – емкость и зарядное напряжение емкостного накопителя соответственно.

Перемещение якоря с бойком возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}.$$

При этом их скорость можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned}
 &V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_p \times \\
 &\quad \times \Delta Z(t_n) + g(m_1 + m_2) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),
 \end{aligned}$$

где  $m_1, m_2$  - масса якоря и исполнительного элемента (силовой пластины и бойка) соответственно;  $K_p$  - коэффициент упругости пружины;  $\Delta Z(t)$  - величина перемещения;  $K_T$  - коэффициент динамического трения;  $\gamma_a$  - плотность воздуха;  $\beta_a$  - коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  - максимальный размер силовой пластины.

На рис.5 показано распределение силовых линий магнитного поля в момент максимума электродинамических сил, действующих на ускоряемый якорь. Здесь используются обозначения: 1 – обмотка; 2 – направляющая втулка; 3 – каркас; 4 – якорь; 5 – силовая пластина; 6 – боек; 7 – концевая часть бойка; 8 - упорный выступ бойка; деформируемая пластина.

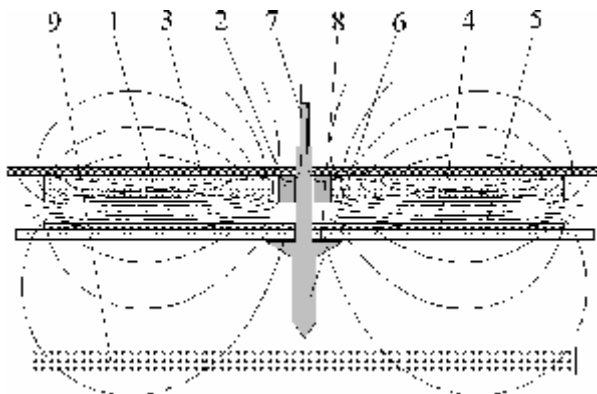


Рисунок 5 – Конструктивная схема и магнитное поле ЛИДД

#### **Описание проведенных экспериментов.**

В ходе экспериментов на испытательной установке проводились исследования квадратных пластин, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Сторона пластины 0,18 м, толщина 1,5 мм и 6,0 мм.

Было проведено четыре серии экспериментов, направленных, во-первых, на решение задачи идентификации значения силы ударного взаимодействия, которую можно получить в используемой установке, а также на исследование свойств малоциклового ударного деформирования образцов и квадратных пластин.

*Тарировка датчиков.* С использованием принятой в экспериментальной механике методологии, была проведена тарировка тензорезисторов. Для сравнения экспериментальных результатов – значений электрического напряжения со значениями компонент тензора деформаций в нагружаемой пластине была использована задача о статическом деформировании шарнирно закрепленной пластины силой, приложенной в ее центре. Как известно, эта задача имеет аналитическое решение [5]. Кроме того, поведение пластины моделировалось в инженерном конечноэлементном пакете.

В ходе экспериментов было проведено 3 цикла ступенчатого нагружения/разгрузки пластины для определения чувствительности датчиков и градуировки шкалы измерений. В центр пластины был установлен пластиковый круг диаметром 2 см и весом 40 г для обеспечения точечного нагружения центра пластины. На эту опору устанавливались веса – эталонные грузы по 2, 4, 6, 8, 10 кг. При каждом нагружении записывалось значение электрического напряжения  $u$  для каждого датчика при известной массе грузе  $m$ . График линейной зависимости  $u$  от  $m$  при нагружении и разгрузке показал линейность процесса деформирования (рис. 6). На этом рисунке точками обозначены данные измерений, приведены результаты, полученные на трех датчиках розетки тензорезисторов, расположенной по центру пластины. Отметим вполне удовлетворительное совпадение значений линейных деформаций в центре пластины.

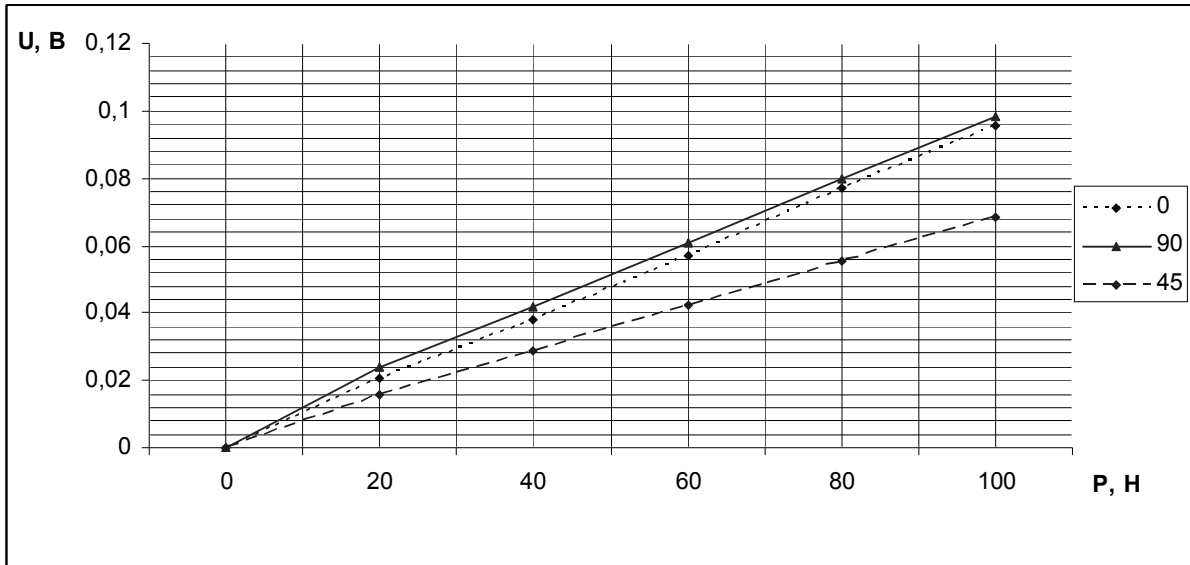


Рисунок 6 - Зависимость электрического напряжения от величины приложенной силы

По результатам тарировки – сравнения полученных значений электрического напряжения на тензорезисторах и расчетных значений деформаций в пластине определены коэффициенты соответствия  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_{12}$ . В табл. 1 приведены результаты измерений электрического напряжения при значении силы, приложенной в центральной точке, равном 100 Н, для двух пластин толщиной 1,5 мм и 6,0 мм соответственно.

Таблица 1

Толщина пластины	Направления тензорезисторов		
	0°	90°	45°
1,5 мм	0,095643 В	0,09848 В	0,06855 В
6,0 мм	0,007058 В	0,005054 В	0,000551 В

Для определения коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_{12}$  использованы соотношения

$$k_1 = \frac{\varepsilon_x}{u_1} \quad k_2 = \frac{\varepsilon_y}{u_2} \quad k_{12} = \frac{\varepsilon_x \cdot l^2 + \varepsilon_y \cdot m^2 + \gamma_{xy} \cdot l \cdot m}{u_{12}} \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  - рассчитанные значения компонентов деформаций;

$u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_{12}$  - измеренные значения электрического напряжения;

$$l, m = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Расчетами получены значения коэффициентов. Для тензорезисторов, расположенных в направлениях 0° и 90°, они оказались равными 3,0E-03, а в направлении 45° - 4,2E-03. На рис. 7 приведены результаты численного решения данной задачи - распределение значений интенсивностей напряжений на поверхности пластины толщиной 1,5 мм.

Расчетами подтверждены основные закономерности деформирования, установленные экспериментально. Так, например, численные данные показали, что значение деформации для пластины толщиной 1,5 мм в 15 раз больше, чем для более толстой

( $h=6$  мм). Это совпадает с результатами экспериментов – значения электрического напряжения также отличаются в 15 раз. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

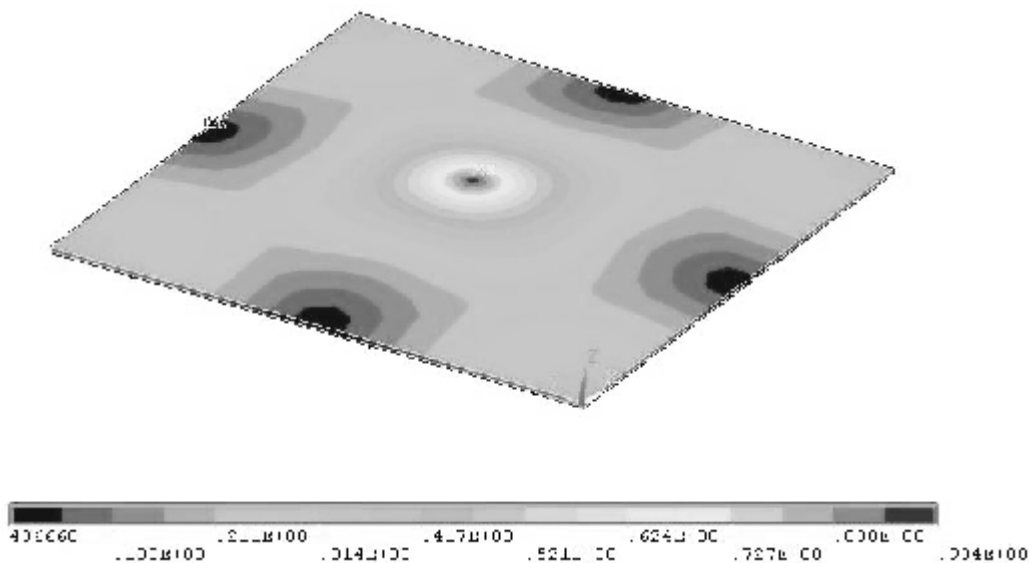


Рисунок 7 - Распределение интенсивностей напряжений

Таблица 2

Толщина пластины	$\varepsilon_x$ , %	$\varepsilon_y$ , %	$\gamma_{xy}$ , %	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа
1,5 мм	3,17E-04	3,17E-04	1,45E-13	88,2	88,2	93,4
6,0 мм	2,14E-05	2,14E-05	-3,13E-14	5,74	5,74	6,6

*Упругий удар по пластине.* Были проведены испытания шарнирно закрепленной стальной пластины  $0,18 \times 0,18 \times 0,006$  м для установления зависимости силы ударного взаимодействия от амплитуды импульса. В этой группе экспериментов и всех последующих использовался цилиндрический ударник диаметром 4 мм, изготовленный из стали 70.

Пластина испытывалась при напряжении емкостного накопителя  $U_0=200$  В и опытным путем установлено, что воздействие ударника при таком напряжении не вызывает пластических деформаций материала.

После 5 серий ударных нагружений установлено среднее значение амплитуды сигнала, снимаемого с центральной розетки пластины, что позволило определить уровень деформаций и напряжений, возникающих в пластине при ударе. Так, для использованного напряжения  $U_0=200$  В указанное значение составило  $\sim 0,0067$  В для датчиков, расположенных под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  и  $0,004$  В для датчика, установленного под углом  $45^\circ$ .

Используя полученные коэффициенты, были определены значения компонент напряженно-деформированного состояния (НДС) пластины (рис.8).

Для силы ударного взаимодействия, возникающей при  $U_0=200$  В, в пластине толщиной 1,5 мм значение интенсивности напряжений составляет 93,4 МПа, а при  $U_0=400$  В – 186,8 МПа. Для тонкого листа из стали 12X18H10T предел текучести  $\sigma_T=205$  МПа. Таким образом, при  $U_0=400$  В напряжения в пластине находятся на границе предела текучести, следовательно, этим же значением определяется возможность применения в расчетах схемы упругой задачи.

Кроме этого, при помощи видеосъемки и тензометрического комплекса (на нем определялось время от начала подачи напряжения на индуктор до момента касания им

пластины) определялась скорость бойка. Полученная в результате измерений скорость оказалась равной 5,18 м/с, что несколько ниже расчетной - 8 м/с.

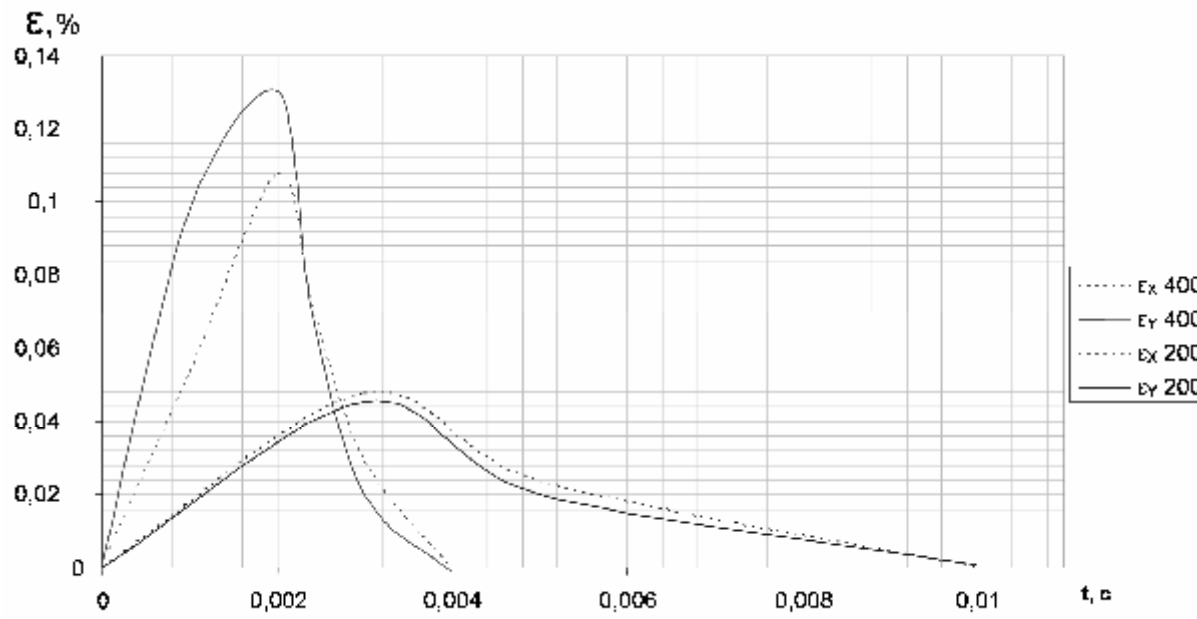


Рисунок 8 - Значения деформации для двух уровней нагружения

*Малоцикловое ударное нагружение.* Для анализа разрушения винчестеров разработана методика проведения экспериментального исследования пластин, находящихся в условиях малоциклового ударного нагружения. В связи с тем, что набор проведенных экспериментальных исследований предназначен для разработки методов проверки численных процедур расчета, были решены две задачи. Первая - разработка методики проведения эксперимента и исследования образцов, изготовленных из материала пластин, для получения характеристик малоциклового ударной прочности. Вторая - опытное изучение малоциклового разрушения самих пластин с использованием описанного экспериментального комплекса и методик испытаний.

Образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т размерами 30х30х1,5 мм закреплены на неупругой подложке и стянуты двумя пластинами таким образом, что ударное нагружение являлось практически одноосным. В верхней пластине предусмотрено отверстие для бойка. Нагружение осуществлялось с помощью ЛИДД. Всего было протестировано 6 образцов (по 3 для двух уровней нагружений).

В результате проведенных на образцах испытаний определены средние значения числа циклов до разрушения. Для первой группы опытов, в которой реализовывалось нагружение с уровнем напряжений 400 МПа, оно составило 146 циклов, а для второй, при напряжении 457 МПа, – 39 циклов. При пробивании образовалась пробка диаметром 4 мм и толщиной 1,1 мм с ровными краями.

На рис. 9 приведена полученная экспериментально кривая малоциклового ударной прочности, а также приведены фотографии образцов, разрушенных при соответствующих уровнях напряжений.

Далее опишем результаты экспериментального исследования малоциклового ударного разрушения шарнирно закрепленных квадратных пластин из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В опытах использованы 3 пластины со стороной 0,18 м и толщиной 1,5 мм. Установлено, что среднее число циклов до разрушения оказалось равным 79. При пробивании также образовывались пробки с такими же параметрами, что и у образцов. На рис. 10 приведена фотография разрушенной пластины.



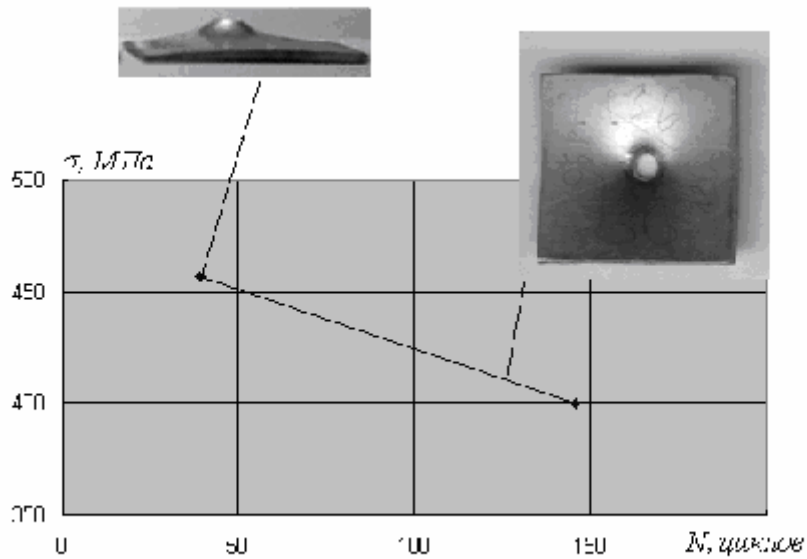


Рисунок 9

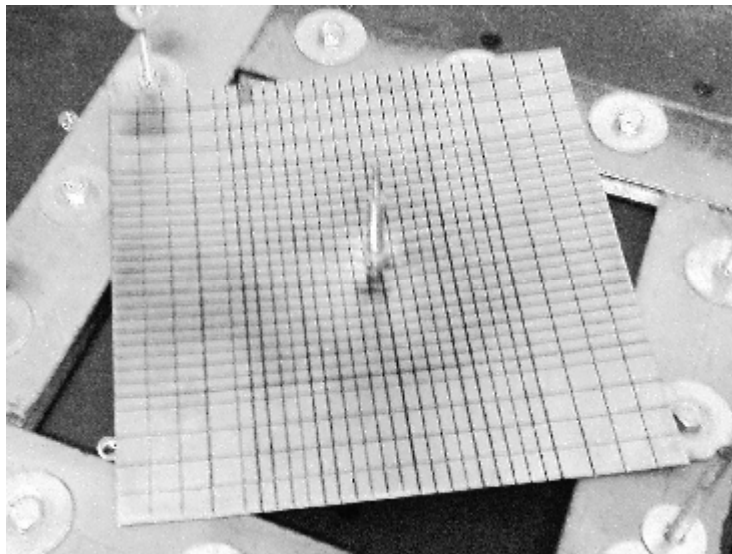


Рисунок 10 - Пробитая пластина с ударником

**Выводы.** В статье описан разработанный авторами метод оценки деформированного состояния и малоциклового прочностного состояния тонких пластин при их ударном нагружении от линейного индукционно-динамического двигателя. Приведено описание экспериментального комплекса, методики и результатов экспериментов, полученных на образцах и квадратных пластинах, изготовленных из стали 12Х18Н10Т.

Литература: 1. Спесивцев А. В. Защита информации в персональных компьютерах. – М., Радио и связь, 1992, с.140-149. 2. Пат РФ № 2256955. Устройство оперативного уничтожения информации на магнитных носителях / Сапрунов А.С., Кузнецов О.А. – МКИ G11B5/024. – 20.07.2005. 3. В.Ф.Болух, А.М.Марков, В.Ф.Лучук, И.С.Щукин. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного

доступа на основе индукционно-динамического двигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2008. - № 2. – С. 5-10. 4. Пат. РФ № 2305329, МКИ G11В 5/024. Способ защиты информации и устройство для его осуществления / Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – З. № 2005120956. – Заявлено 04.07.2005. – Опубл. 28.08.2007. Бюл. № 24. 5. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М., 1965. 451 с. 6. G. Ben-Dor, A.Dubinsky, T.Elperin. Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics—a Review// Applied Mechanics Reviews, November 2005, Vol. 58. – P. 355-371. 7. J.E. Field. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. Vol. 30, 2004. – P. 725–775. 8. Д.В.Бреславский, И.В.Наумов, А.В.Онищенко. Экспериментальное исследование процессов ударного нагружения тонких пластин// Вісник НТУ «ХП». – Харків, НТУ «ХП». 2007, № 38. – С. 30-35. 9. J.A.Andrews, J.R.Devine. Armature design for coaxial induction launchers // *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 27, № 1, 1991. P. 639-643. 10. В.Ф.Болюх, А.М.Марков, В.Ф.Лучук, И.С.Щукин. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - 2006. - Ч. 2. - С. 65-70.

Наумов І.В., Болюх В.Ф., Бреславський Д.В.

**ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ПЛАСТИН ПРИ НАВАНТАЖЕННІ  
ЦИЛІНДРИЧНИМ УДАРНИКОМ**

Статтю присвячено опису експериментального комплексу, призначеного для дослідження деформування та руйнування тонкостінних конструкцій при ударному навантаженні, методики та результатів експериментів. Описано процедури визначення параметрів деформованого стану пластин. Експериментально отримані залежності малоциклової ударної міцності зразків зі сталі 12Х18Н10Т.

Naumov I.V., Bolyukh V.F., Breslavsky D.V.

**DEFORMATION AND FRACTURE OF PLATES LOADED BY  
CYLINDRICAL IMPACTOR**

The paper is devoted to the description of experimental complex, designed for the investigations of deformation and fracture in thin-walled structures under impact loading, as well as experimental technique and results. The procedures for strain state determining are described. The laws of low-cycle impact strength for specimens made from 12X18H10T steel were experimentally obtained.

---