

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

В.Г. Баженов², А.К. Ботвинкин¹, С.С. Куканов¹, В.И. Романов¹,
А.А. Рябов¹, С.Г. Скурихин¹

¹*Саровский Инженерный Центр, Нижегородская обл., п. Сатис, 607328, Россия*

²*Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета
им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, Россия*

Приводятся результаты численных и экспериментальных исследований динамического упругопластического деформирования круглой пластины постоянной толщины при ударе короткого цилиндрического стержня, несущего значительную кинетическую энергию присоединенной массы. Компьютерная модель верифицируется путем сравнения расчетных и опытных данных по динамическим нагрузкам, остаточным прогибам и деформациям пластины. Подробно анализируются особенности процесса деформирования и разрушения пластины.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DYNAMIC DEFORMATION AND DESTRUCTION OF A PLATE SUBJECTED TO LOCAL LOADING

V.G. Bazhenov², A.K. Botvinkin¹, S.S. Kukanov¹, V.I. Romanov¹,
A.A. Ryabov¹ and S.G. Skurikhin¹

¹*Sarov Engineering Center, Nizhny Novgorod Region, Satis, 607328, Russia*

²*Research Institute of Mechanics of Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

The numerical simulation and experimental results and their analysis are presented for the dynamic elastic-plastic deformation of a disk subjected to penetrating loading produced by a short cylindrical steel pin. The pin keeps the high level of kinetic energy due to the heavy joined mass. The computer model has been verified by the comparison of the numerical and experimental dynamic forces, and the residual displacements and deformations of the plate. The careful analysis of the deformation and failure of the plate is presented in the paper.

В ряде областей техники, например, при создании защитных контейнеров для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива или при проектировании бортовых регистраторов летательных аппаратов, силовые корпуса изделий должны выдерживать интенсивные аварийные нагрузки, в число которых входит проникающее воздействие штыря. Подобные режимы нагружения характеризуются высокими уровнями кинетической энергии, вводимой в систему, и вызывают значительные локальные деформации стенок изделий при относительно низких скоростях деформации. Так, по результатам расчетно-экспериментальных исследований, представленных в работе Ammerman D.J. и др. [1], в частности отмечается, что при падении на штырь локальные деформации стенки могут существенно (более чем в два раза) превышать значение остаточного относительного удлинения материала, не приводя к разрушению стенки. В связи с этим численные исследования низкоскоростного локального деформирования с целью выявления особенностей процессов и количественных расчетно-экспериментальных критериев прочности являются весьма актуальными.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача динамического упругопластического деформирования круглой пластины постоянной толщины при ударе короткого цилиндрического стержня, верхняя часть которого жестко закреплена в твердом теле массой $M = 227$ кг. Начальное значение кинетической энергии падающей конструкции составляет $E_k = 1.33$ кДж (Рис. 1). Пластина закреплена по торцу короткого толстостенного цилиндра с внутренним диаметром D . Опорный цилиндр установлен на стальной плите, лежащей на слое песка определенной влажности. Толщина пластины равна $h/D = 0.04$, диаметр штыря — $d/D = 0.06$, толщина цилиндра — $h_c/R = 0.53$, где R — радиус срединной поверхности опорного цилиндра; h_c — толщина цилиндра. Точка удара стержня смещена от центра пластины на 7.4 мм. При моделировании учитывается возможность контактного взаимодействия торцевой и боковой поверхностей стержня как с пластиной, так и с падающим грузом.

Материал пластины имеет следующие механические характеристики, установленные в испытаниях на разрыв цилиндрических образцов, изготовленных из того же материала, что и пластина: $\sigma_{0.2} = 1450$ МПа; $\sigma_b = 1940$ МПа; $\delta = 4.7\%$. Штырь изготовлен из материала HRC 39-45, для которого $\sigma_{0.2} = 1600$ МПа, $\sigma_b = 1750$ МПа, $\delta = 20...24\%$. При проведении расчетов деформирование песка описывается на основе экспериментальной зависимости, связывающей давление в сыпучей среде с объемной деформацией. Численные и экспериментальные исследования показывают, однако, что в рассматриваемой задаче свойства песка оказывают слабое влияние на процесс деформирования пластины.

Для решения задачи динамического деформирования пластины на основе программных средств «ДИНАМИКА-3» [2], разработана трехмерная компьютерная модель с высокой дискретизацией по пространству. Характерные размеры конечных элементов пластины в зоне контакта со штырём составляют $0.5 \times 0.7 \times 0.7$ мм. По толщине пластина разбивается на 8 элементов, а штырь — на 20 элементов по диаметру. Упругопластическое поведение материала описывается на основе теории течения с изотропным и кинематическим упрочнением.

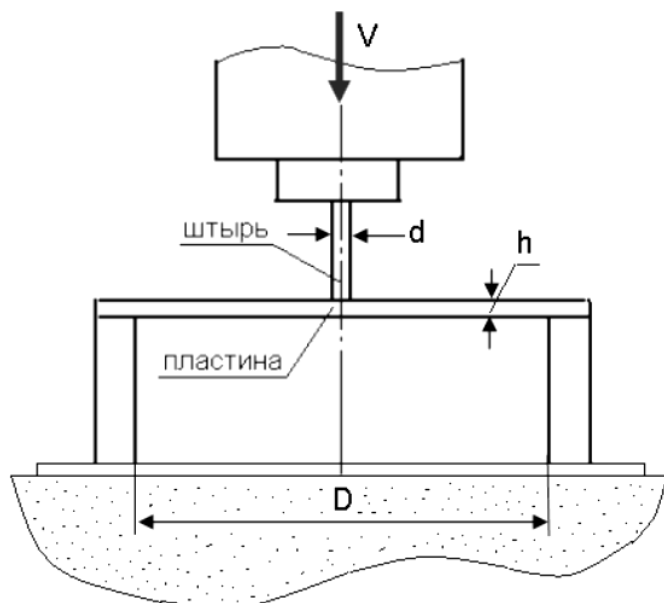


Рис. 1. Схема нагружения пластины

2. Верификация компьютерной модели

Верификация компьютерной модели проводится путем сравнения расчетных и экспериментальных параметров по контактному усилию, перемещениям и деформациям пластины в характерных точках. На рисунке 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения во времени усилия воздействия штыря на пластину. Сравнение показывает, что численные и опытные результаты близки качественно и количественно. В расчете и в экспериментах отмечается два последовательных импульса силы и следующее за ними ее плавное нарастание и снижение. Процесс взаимодействия штыря с пластиной начинается с быстрого роста контактного усилия, которое по расчетам в течение времени $\Delta t_1 \sim 0.5$ мс возрастает до $F_{1\max} \sim 4.5$ кН, а затем снижается почти до нуля. Первый расчетный импульс силы длительностью примерно 1 мс близок по времени с результатами измерений в первом и втором опытах, где максимумы несколько ниже: $F_{1\text{э}\max} \sim 24...35$ кН. В результате первого импульса стержень теряет устойчивость. В момент потери устойчивости кинетическая энергия присоединенной массы штыря составляет $\sim 96\%$ от исходного значения. Изгиб стержня продолжается примерно 4...5 мс. Затем изогнутый стержень частью своей боковой поверхностью ложится на пластину и зажимается между пластиной и грузом. Тем самым начинается вторичное нагружение пластины уже через боковую поверхность согнутого стержня. Второй импульс силы длится примерно $\Delta t_2 \sim 5$ мс и достигает расчетного максимума $F_{2\max} \sim 107.5$ кН, что весьма близко к экспериментальным данным: $F_{2\text{э}\max} \sim 89...104$ Н. Далее происходит разгрузка примерно до уровня $F_{1\max} \sim 3.2...3.8$ кН, а затем вновь возрастание до $F_{3\max} \sim 67$ кН и плавное снижение.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточных прогибов пластины представлено в таблице. Согласно приведенным значениям, во всех точках измерения прогибы, зафиксированные в опыте, несколько выше расчетных значений. В точках 17, 18, 19, удаленных от зоны удара, отличие расчетных и опытных значений перемещений не превышает $\sim 3...4\%$. В точках 0, 1, 2 и 3 разница составляет не более $\sim 7...9\%$. В остальных точках отличие достигает значения $\sim 17...35\%$.

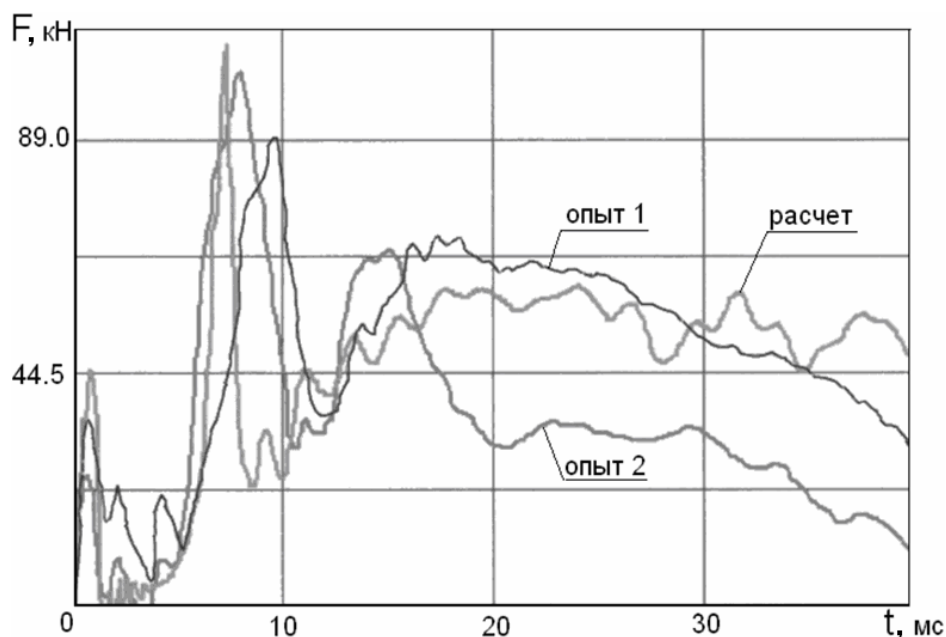


Рис. 2. Усилие воздействия штыря на пластину

Таблица. Расчетные и экспериментальные значения остаточных прогибов пластины

Номер точки		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прогиб, мм	Опыт	8.62	6.25	7.17	8.23	7.2	8.41	6.88	7.94	7.05	9.1
	Расчет	7.9	5.7	6.7	7.6	6.0	6.7	5.22	5.64	4.8	7.1
Отличие, %		8.3	8.8	6.5	7.6	16.7	17.1	24.1	30.0	31.9	22.0
Номер точки		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Прогиб, мм	Опыт	9.07	8.35	7.25	7.77	7.72	7.21	6.64	7.31	6.58	5.96
	Расчет	6.5	5.7	4.71	6.0	5.63	5.1	5.12	7.1	6.34	5.8
Отличие, %		28.3	31.7	35.0	22.8	27.1	29.3	22.9	2.9	3.6	2.7

Максимальные отклонения наблюдаются в точках 7, 8, 10, 11, 12, которые ближе всего расположены к трещине, возникающей в испытываемой пластине.

Экспериментально установлено, что при действии первого импульса нагрузки пластина сохраняет прочность. Трещина возникает во время вторичного нагружения пластины после изгиба стержня и его замыкания боковой поверхностью на поверхность пластины.

Сравнение расчетных и экспериментальных деформаций на нижней поверхности пластины (противоположной удару) проводится по четырем датчикам. Схема размещения тензодатчиков, а также зона первого удара штыря и возникшая трещина показаны на рисунке 3. Стрелками на датчиках указываются направления, в которых датчики измеряют деформацию. На этом же рисунке приведено сравнение расчетной и экспериментальной кривых зависимости изменения деформаций во времени в зоне установки датчика 1. Анализ показывает, что первый и второй импульсы силы вызывают в пластине соответствующие пики деформаций во всех четырех точках регистрации деформаций пластины. В зоне установки датчика 1 отмечается хорошее согласование расчетных и опытных деформаций по первому и второму пикам нагружения как по времени, так и по амплитудам. В момент времени 6.8 мс деформации в зоне датчика 1 достигают расчетного максимума $\varepsilon_{\max} \sim 0.52\%$, значение которого близко к уровню максимума деформаций, зафиксированного в эксперименте $\varepsilon_{\max} \sim 0.62\%$. Близость результатов расчетов и испытаний наблюдается также и по датчикам 2 и 3 до момента времени $t^* \sim 6 \dots 7$ мс. Поэтому можно предположить, что при $t = t^*$ образуется трещина, и это является причиной возникновения некоторых отличий расчетных и опытных данных при значениях $t > t^*$. Датчик 4 расположен очень близко к зоне первого удара.

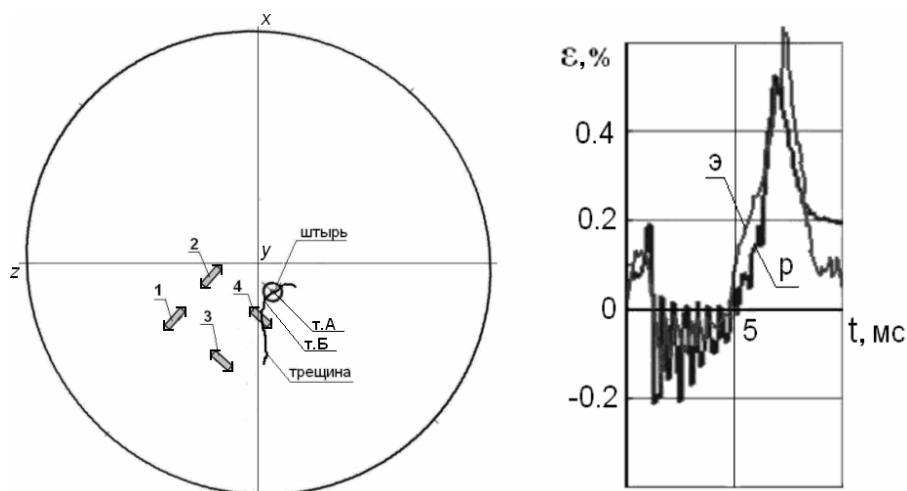


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных деформаций по датчику 1

датчика 4 расчетные деформации пластины близки к экспериментальным деформациям до момента времени примерно 0.5 мс, достигая значения $\varepsilon \sim 1\%$. Образовавшаяся трещина проходит по датчику 4 (Рис. 3). По-видимому, датчик выходит из строя и далее фиксирует недостоверную информацию.

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод об адекватности компьютерного моделирования динамического деформирования пластины до момента образования трещины. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет также определить интервал времени $t^* \sim 6...7$ мс, в течение которого в пластине образуется трещина. За момент разрушения принимается значение $t^* = 7$ мс.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния пластины

Расчеты и эксперименты показывают, что при нагружении пластины деформации локализуются в окрестности центра первого удара стержня. Интенсивность полных деформаций достигает уровня $\varepsilon_{i \max} = 13\%$. Анализ результатов расчетов показывает, что на протяжении всего процесса деформирования в наиболее нагруженной точке доминируют нормальные компоненты тензора деформации: две растягивающие -- ε_x и ε_z , и одна сжимающая — ε_y . Направление осей x , y и z показано на рисунке 3. На пике усилия от первого удара деформации пластины достигают значений: $\varepsilon_x = +5.5\%$, $\varepsilon_z = +6.0\%$, $\varepsilon_y = -11\%$, $\varepsilon_i = 11\%$, что превышает относительное удлинение $\delta = 4.7\%$. Однако, согласно результатам экспериментов, при действии первого импульса нагрузки пластина сохраняет прочность. На втором пике контактного усилия, весьма близкого ко времени разрушения $t^* \sim 7$ мс, интенсивность деформаций достигает максимального уровня $\varepsilon_{i \max} = 13\%$, что почти в 2.5 раза превышает δ . Максимальные значения скорости деформаций пластины составляют $150...260 \text{ с}^{-1}$.

Анализ траекторий деформаций в пространстве Ильюшина для отдельных точек пластины показывает, что до момента времени $t = 6$ мс траектории имеют относительно небольшую кривизну и процесс деформирования близок к простому. В дальнейшем, при вторичном нагружении, процесс деформирования становится локально сложным [3], но, согласно постулату запаздывания А.А. Ильюшина, применение теории течения оправдано для рассматриваемой задачи

Изменение главных напряжений в наиболее нагруженной точке показано на рисунке 4. В процессе нагружения при первом импульсе в этой точке реализуется двухосное напряженное состояние, причем оба растягивающие напряжения достигают предела прочности материала $\sigma_1 \sim \sigma_2 \sim 2000 \text{ МПа}$. В процессе потери устойчивости стержня происходит разгрузка, сопровождающаяся двухосным сжатием. При втором импульсе нагружения напряженное состояние также близко к двухосному растяжению. При этом главные напряжения σ_1 возрастают до $\sim 2200 \text{ МПа}$, а σ_2 снижаются до $\sim 1500 \text{ МПа}$. При разгрузке после второго импульса нагружения напряжения в пластине снижаются почти до нуля. В опытах разгрузка наступает несколько раньше, по-видимому, из-за появления трещины.

Параметр вида напряженного состояния выбирается в форме [4]:

$$II = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}.$$

Изменение во времени параметра вида напряженного состояния в центре первого контакта стержня (точка «А» на Рис. 3) и в наиболее нагруженной точке (точка «Б» на Рис. 3), приведено на рисунке 5. Из графика видно, что характер изменения параметра II в точках «А» и «Б» весьма близок до момента $t^* = 7.0$ мс, обозначенного на рисунке точкой (•).

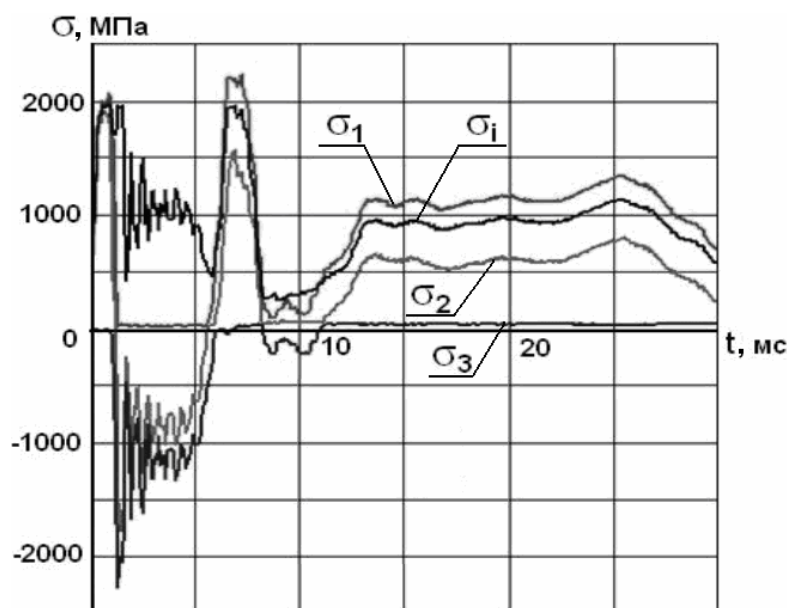


Рис. 4. Главные напряжения в наиболее нагруженной точке

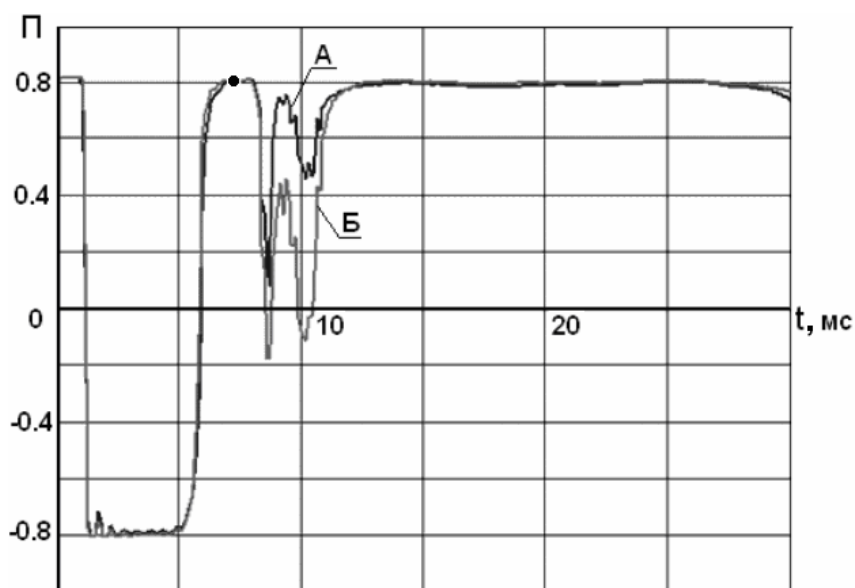


Рис. 5. Изменение параметра вида напряженного состояния Π

Можно констатировать, что разрушение пластины происходит при двухосном растяжении $\Pi = 0.8$.

4. Энергетические параметры

Рассмотрим энергетические параметры в наиболее нагруженной зоне. На рисунке 6 показано изменение удельной энергии деформации в точках «А» и «Б». Из графика видно, что во время первого импульса нагружения удельная энергия в обеих точках пластины достигает уровня $J = 0.21 \dots 0.22$ Дж/мм³, однако разрушения пластины не происходит. При втором импульсе нагружения удельная энергия деформации в точке «Б» определим, что разрушение происходит при значении удельной энергии деформации $J^* \sim 0.25$ Дж/мм³.

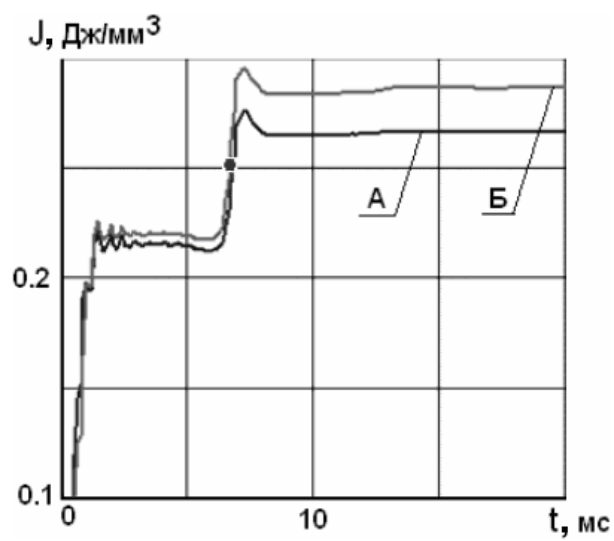


Рис. 6. Удельная энергия деформации

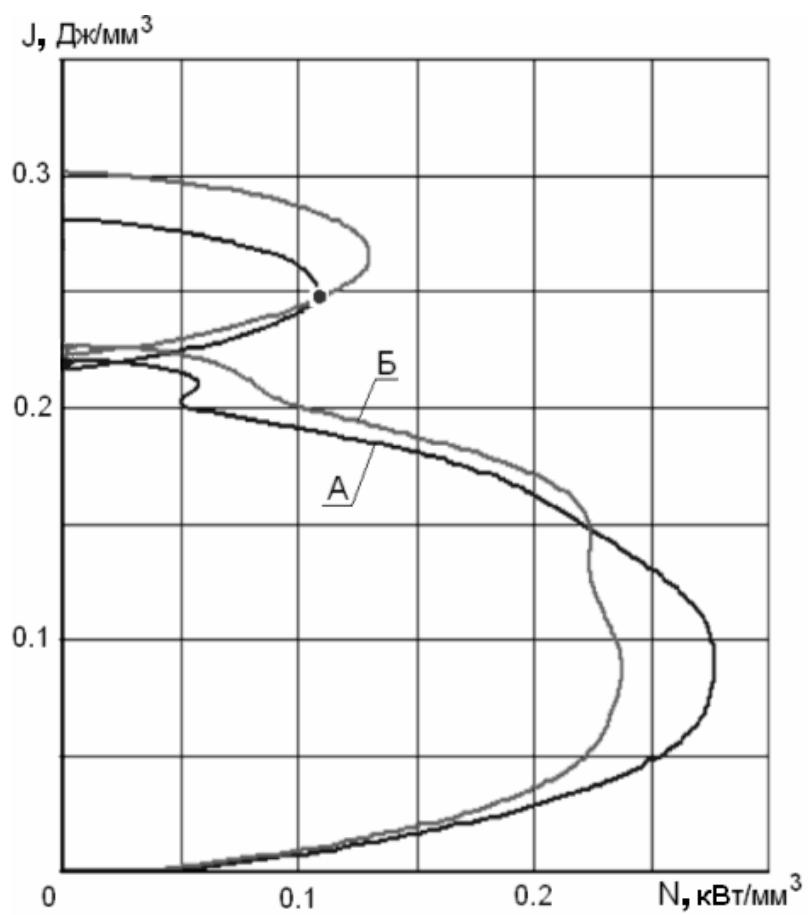


Рис. 7. Удельная энергия и мощность деформации

Расчеты показывают (Рис. 7), что при первом импульсе мощность деформации в точке «А» достигает максимального значения, равного $N = 0.275$ кВт/мм³. При этом удельная энергия деформации составляет всего $J = 0.1$ Дж/мм³. Дальнейшее повышение удельной энергии деформации при снижении мощности деформации не приводит к разрушению пластины. Разрушение происходит во втором импульсе, когда энергия деформации повышается до $J = 0.25$ Дж/мм³ при возрастающей мощности деформации, достигающей значения $N = 0.11$ кВт/мм³. Таким образом, процесс разрушения в рассматриваемой задаче, характеризуется следующими параметрами: $R_{кр} = R(\Pi, J, N) = R(0.8, 0.25 \text{ Дж/мм}^3, 0.11 \text{ кВт/мм}^3)$.

Выводы

По результатам исследований необходимо отметить следующее:

1. Процесс соударения представляет собой сложное нагружение, характеризующееся контактным взаимодействием теряющего устойчивость стержня и упругопластически деформируемой пластины. Полученные численные результаты хорошо согласуются с данными испытаний по усилиям, прогибам и деформациям пластины, что подтверждает достоверность компьютерного моделирования.

2. При первом ударе в результате продольно поперечного изгиба стержня происходит его выпучивание. Уровень интенсивности деформаций в пластине в зоне первого удара достигает $\varepsilon_i = 11\%$, мощность деформации возрастает до максимального значения $N = 0.275$ кВт/мм³ при уровне удельной энергии деформации $J = 0.1$ Дж/мм³. При первом ударе стержня разрушение пластины не происходит.

3. После изгиба стержня, во время второго удара в пластине образуется локальная трещина. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет определить интервал времени образования трещины в пластине: $t^* \sim 6...7$ мс. Из расчетов следует, что разрушение пластины происходит в условиях близких к двухосному напряженному состоянию и характеризуется следующими параметрами: $R_{кр} = R(\Pi = 0.8, J = 0.25 \text{ Дж/мм}^3, N = 0.11 \text{ кВт/мм}^3)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (грант НШ–3367.2008.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-01–00500_a).

Литература

1. Ammerman D.J., Radloff H.D., Eifert E. J. Testing and Analysis to Determine the Shell Thickness Required to Determine the Shell Thickness Required to prevent Puncture // Proceedings of the 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials. PATRAM 98. Paris, France, May 10-15. – 1998. – V. 3. – P. 1255–1262.
2. Баженов В.Г., Кибец А.И. Численное моделирование трехмерных задач нестационарного деформирования упругопластических конструкций методом конечного элемента // Изв. РАН. МТТ. – 1994. – №1. – С. 52–54.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 272 с.
4. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Нижний Новгород: ННГУ, 1999. – 225 с.