

Исследование кавитационной устойчивости поверхности алюминиевого поршня на основе трехмерной модели¹

Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Рассматривается задача определения оптимального материала для изготовления поверхности подвижного элемента (поршня), которая обладает повышенной стойкостью к кавитационному разрушению, с целью обоснования целесообразности применения конструкционных материалов для изготовления поршней в элементах топливной автоматики. На основе трехмерного численного моделирования уравнений упругости исследуются условия, при которых кавитационное схлопывание пузырька на поверхности поршня, изготовленной из различных конструкционных материалов, может привести к необратимым деформациям поршня. Давление, действующее на поршень, определялось из модели схлопывания несферического пузырька с образованием кумулятивной струйки. Изучено влияние на поверхность схлопывания как одиночного пузырька, так и пары пузырьков, расположенных на различном расстоянии друг от друга. Расчеты показали, что при специальной обработке поверхность поршня станет более устойчивой к эрозионному разрушению; деформации локализованы вблизи области, к которой приложена сила, на расстоянии порядка двух диаметров пузырька; кавитационное разрушение материала связано с порогом текучести и размером зерен, не зависит от модуля Юнга и обратно пропорционально коэффициенту Пуассона; одновременное схлопывание двух пузырьков на расстоянии порядка одного-двух размеров пузырька увеличивает максимальное давление на поверхность и, следовательно, увеличивает вероятность необратимой деформации поверхности.

Ключевые слова: схлопывание пузырька, упругие деформации, предел текучести, поршень

1. Введение

В конструкцию многих технических устройств могут входить один или несколько основных элементов, содержащих поршень. Так, например, устройство (агрегат) дозирования топлива может состоять из нескольких элементов, содержащих один или несколько поршней, таких как полость дозирующей иглы, клапан постоянного давления, клапан постоянного перепада давления и распределительный клапан. Все они выполнены с возможностью перемещения подвижного элемента в цилиндрическом корпусе (штулке). Рабочей средой тех-

нического устройства является жидкость (топливо), которая всегда содержит в себе растворенный воздух от 11% до 18% от объема согласно данным работы [1]. При динамическом взаимодействии с топливом в ходе эксплуатации на границе взаимодействия поршня и топлива возможно возникновение условий для появления кавитации. А именно, в тех участках потока, где давление понижается до некоторого критического значения (в рассматриваемом случае — около подвижной стенки), образуются воздушные пузырьки, которые, схлопываясь при резком изменении температуры и давления топлива, вызывают разрушение поверхности металла самого поршня, что, как следствие, приводит к потере качества управления всего агрегата топливопитания.

Кавитационному разрушению подвержены практически все известные конструкционные материалы, причем данное разрушение деталей

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-01-97019-р_поволжье_a, 14-08-97027-р_поволжье_a, 17-41-020582-р_a), АН РБ (договора №№ 40/11-П, 40/59-П, 40/10).

начинается с тонких поверхностных слоев их материала [2]. Поэтому задача определения оптимального материала для изготовления поверхности подвижного элемента для повышения её износостойкости, термической и механической прочности, а также стойкости к кавитационному разрушению, является важной. Решение данной задачи позволит в дальнейшем обеспечить безопасность устройства дозирования топлива и долгосрочность его работы. Так, например, в работе [3] было предложено выполнение поршня из алюминиевого сплава, содержащего упрочненную интенсивной пластической деформацией (ИПД) головку с ультрамелкозернистой структурой материала, торец которой обработан лазером для уменьшения вероятности появления кавитации в ходе работы поршня.

Целью данной работы является обоснование целесообразности применения конструктивных материалов для изготовления поршней в элементах топливной автоматики. Для достижения поставленной цели на основе трехмерного численного моделирования уравнений упругости рассматриваются условия, при которых кавитационное схлопывание пузырька на поверхности поршня, изготовленной из различных конструктивных материалов, может привести к необратимым деформациям поршня.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Упругие деформации твердого тела описываются уравнением движения (второй закон Ньютона), связывающим динамическое изменение вектора перемещений \mathbf{u} и действия внутренних, описываемых тензором напряжений $\bar{\bar{\sigma}}$, и объемных сил \mathbf{f} :

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \bar{\bar{\sigma}} + \mathbf{f}. \quad (1)$$

В рассматриваемой задаче объемные силы отсутствуют ($\mathbf{f} = 0$). Вместе с динамическими уравнениями (1) решается задача, когда внешняя сила приложена в течении достаточно большого промежутка времени и устанавливается постоянное поле деформаций, т.е. стационарная задача (производная по времени в уравнении (1) равна нулю):

$$\nabla \bar{\bar{\sigma}} = 0. \quad (2)$$

В изотропном теле тензор напряжений $\bar{\bar{\sigma}}$ зависит от тензора деформаций $\bar{\bar{\epsilon}}$ и вектора перемещений $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ следующим образом:

$$\bar{\bar{\sigma}} = 2\mu \bar{\bar{\epsilon}} + \lambda(\nabla \mathbf{u}) \bar{\bar{I}}, \quad (3)$$

где $\bar{\bar{I}}$ — единичный вектор; а коэффициенты Ламе

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

зависят от модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν .

Подставляя (3) в уравнение (1) с учетом $\mathbf{f} = 0$ и исключая тензор деформаций $\bar{\bar{\epsilon}}$ согласно определению

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T),$$

получим уравнение равновесия, содержащее только вектор перемещений:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \lambda (\nabla \mathbf{u}) \bar{\bar{I}} \right]. \quad (4)$$

Внешнее воздействие на поршень при схлопывании пузырька проявляется в виде давления p , приложенного к области поверхности поршня площадью πR_b^2 , где R_b — радиус пузырька. Если возникающие при этом воздействия напряжения превысят предел текучести материала, то деформации становятся необратимыми (пластическими), что может привести к разрушению поверхности поршня. Для оценки величины внутренних напряжений используется тензор эквивалентных напряжений (напряжения фон Мизеса):

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right], \quad (5)$$

где

$$\sigma_{ii} = \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial i} \quad (i = x, y, z);$$

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \quad (i, j = x, y, z, i \neq j).$$

Рассмотрим граничные условия (в системе координат $Oxyz$, показанной на рис. 1). Плоскость $x = L$ элемента поршня закреплена ($u_x = 0$). На остальные плоскости ограничения не накладываются (свободные условия). Давление p прикладывается на плоскости $x = 0$ к элементу поверхности S_1 , имеющему форму круга радиуса R_b (для пары пузырьков — к двум элементам поверхности $S_2^{(I)}$ и $S_2^{(II)}$) в виде условия Неймана, т.е. $\bar{\bar{\sigma}} \bar{\bar{n}} = p$.

Разрушительному воздействию пузырька около стенки (твердой или упругой) посвящен ряд работ, обзор которых можно найти, например, в [4, 5]. В самих работах [4, 5] рассмотрено импульсное воздействие высокоскоростной кумулятивной жидкой

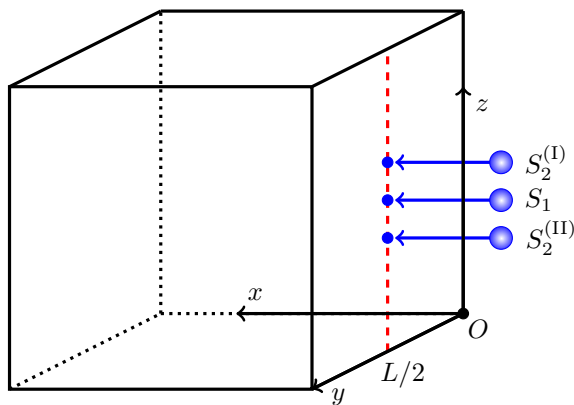


Рис. 1. Геометрия модели в декардовой системе координат: S_1 — для случая одиночного пузырька; $S_2^{(I)}$ и $S_2^{(II)}$ — для случая пары пузырьков

струи, возникающей при коллапсе пузырька около упруго-пластической поверхности. Данная задача решается численно с помощью модели линейной акустики для описания волн в жидкости и модели линейно-упругого тела для описания волн в полупространстве. Численное решение в данной постановке позволяет изучить изменение положения и конфигурации зон текучести, возникающих в приповерхностном слое тела, но является достаточно трудоемким и сложным и требует значительных затрат машинного времени. В нашей работе для достижения поставленной цели достаточно применения аналитических формул, дающих качественные оценки условий, при которых кавитационное схлопывание пузырька на поверхности поршня имеет высокий потенциал, способный привести к необратимым деформациям поршня. В дальнейшем для получения более точного количественно результата необходимо применения методик расчета задачи, разработанных в работах [4, 5].

По существующей гипотезе Корнфельда–Суворова [6] эрозионное разрушение материала вызывает «прошивающая» кавитационный пузырек кумулятивная струйка, образующаяся при несимметричном коллапсе пузырька вблизи твердой стенки.

Скорость струйки $V_{стр}$ и время схлопывания (по Рэлею) t_{col} можно оценить следующими формулами [7]:

$$V_{стр} = 12.8 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad t_{col} = 1.109 \frac{R_{max}}{\sqrt{\Delta P/\rho}}, \quad (6)$$

где $\Delta P = P_l - P_b$ — разность давлений в жидкости и пузырьке; ρ — плотность жидкости; R_{max} —

максимальный радиус пузырька.

При несферическом схлопывании пузырька в сжимаемой жидкости с образованием кумулятивной струйки на начальной стадии удара, когда достигаются максимальные значения давления, давление можно получить из уравнения гидравлического удара [8]:

$$P_{стр} = \frac{\rho C V_{стр} \rho_s C_s}{\rho C + \rho_s C_s}, \quad (7)$$

где C — скорость звука. Индекс s относится к материалу поверхности, о которую ударяется струя.

Критерием перехода от упругих деформаций к пластическим является превышение напряжением фон Мизеса предела текучести. При выполнении этого критерия воздействие струи при схлопывании пузырька вызывает необратимые деформации, что может привести к разрушению поверхности поршня.

Рассмотрим два вида алюминиевых сплавов (АК4-1 и АД33) методами, представленными в работах [9, 10]. Механические свойства сплава АК4-1 были определены после следующих обработок:

- двух циклов ИПД методом равноканального углового прессования (РКУП) при 100°C;
- РКУП и последующей термической обработки, включающей искусственное старение (ИС), при 190°C 10 часов;
- серийной упрочняющей обработки Т1.

Механические свойства сплава АД33 были определены после следующих обработок:

- ИПД кручением (ИПДК);
- ИПДК и отжигу при температуре 160°C;
- серийной упрочняющей обработки Т1.

В табл. 1 приведены значения условного предела текучести $\sigma_{0.2}$ и предела прочности σ_B сплавов.

3. Результаты численного исследования

Проведено исследование степени влияния схлопывания пузырька на часть поршня размером $L \times L \times L$, где $L = 1$ мм. При численном моделировании использовалась прямоугольная расчетная сетка размером $N_1 = [60 \times 250 \times 250]$ (3843061 узлов). Точность расчета проверялась по максимальному значению перемещения $\max(u_x)$. Из сравнения $\max(u_x)$, полученным по сетке N_1 , с $\max(u_x)$, рассчитанным на сетках размером $N_2 = [40 \times 150 \times 150]$ (934841 узлов) и $N_3 = [50 \times 200 \times 200]$ (2060451

узлов), были получены относительные погрешности 0.9% и 0.3% соответственно. Область воздействия пузырька — круг радиуса $R_b = 0.05$ мм. Перемещения \mathbf{u} определялись решением уравнения (4) численно в вариационной формулировке (в пакете численного моделирования FreeFem++ [13]) методом конечных элементов:

$$\begin{aligned} & \int_V \rho \frac{\mathbf{u}_j - 2\mathbf{u}_{j-1} + \mathbf{u}_{j-2}}{\tau^2} \cdot \mathbf{v} dV + \\ & + \int_V \frac{\mu}{2} (\nabla \mathbf{u}_j + \nabla \mathbf{u}_j^T) \cdot (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \\ & + \int_V \lambda (\nabla \mathbf{u}_j) \cdot (\nabla \mathbf{v}) dV + \\ & + \int_S (-p) \cdot f(y, z) \cdot \mathbf{v} dS = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь вторая производная по времени раскладывается в виде конечной разности, а индексы $j, j-1, j-2$ определяют текущий момент времени t и два предыдущих момента $t-\tau$ и $t-2\tau$ соответственно; τ — шаг по времени, который в расчетах принимается равным 0.5 нс; \mathbf{v} — пробные функции; объемный интеграл считается по всему объему V поршня; поверхностный интеграл вычисляется по ребру S в плоскости $x=0$; $f(y, z)$ — функция, определяющая область с радиусом R_b и центром в точке (y_0, z_0) , на которую действует давление $-p$ (знак минус означает, что сила струйки пузырька действует в противоположном направлении к нормали площади S). Функция $f(y, z)$ для одиночного пузырька опреде-

ляется как $f(y, z) = f_0(y, z)$, где

$$f_i(y, z) = \begin{cases} 1 & \text{при } (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \leq R_b^2; \\ 0 & \text{при } (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 > R_b^2 \end{cases}$$

с $i = 0$, а для парных пузырьков с центрами в точках (y_1, z_1) и (y_2, z_2) — как $f(y, z) = f_1(y, z) + f_2(y, z)$. Напряжения фон Мизеса определялись по известным значениям перемещений \mathbf{u} по формуле (5).

Рассмотрим давления, возникающие при схлопывании пузырька в топливе ТС-1 (высший сорт) с плотностью $\rho = 780$ кг/м³ и скоростью звука $C = 1330$ м/с при $T_0 = 20^\circ\text{C}$, около поверхности алюминия с плотностью $\rho_s = 2700$ кг/м³ и скоростью звука $C_s = 5240$ м/с. В этом случае формула (7) дает значение $P_{\text{стр}} = 396$ МПа, если в первой формуле (6) разность давлений в жидкости и пузырьке равна $\Delta P = 8$ атм (среднее значение давления в основных элементах топливной автоматики при рабочем режиме эксплуатации). Модуль Юнга равен $E = 74$ ГПа, а коэффициент Пуассона — $\nu = 0.33$. В качестве критерия разрушения рассматривается появление эквивалентных напряжений в поршне, превышающих предел текучести, т.е. деформации становятся необратимыми и после снятия нагрузки. Как видно из табл. 1, при стандартной обработке (Т1) как сплава АК4-1, так и АД33 предел текучести $\sigma_{0.2}$ меньше значения $P_{\text{стр}}$, в то время, как при других видах обработок предел текучести значительно выше данного значения. Следовательно, при специальной обработке поверхность поршня станет более устойчивой к эрозийному разрушению.

В начале рассмотрим время установления деформаций и напряжений при действии единичного пузырька, решая динамическую задачу (8). На рис. 2 показана зависимость максимального значения деформации u_x от времени. Видно, что поле деформаций устанавливается за время порядка 70 нс. Максимальное значение эквивалентных напряжений в зависимости от времени показано на рис. 3. За время порядка 10 нс достигается значение $\max(\sigma_v) = 300$ МПа, в интервале между 30 нс и 50 нс значения $\max(\sigma_v)$ превышают 350 МПа, а после 70 нс устанавливается стационарное значение $\max(\sigma_v) = 300$ МПа. Для алюминия при стандартной обработке (Т1) $\max(\sigma_v) \leq \sigma_{0.2} = 320$ МПа (см. табл. 1), т.е. предел текучести превышен в промежутке времени от 18 нс до 62.5 нс. Время схлопывания пузырька, в зависимости от его размера, лежит в промежутке от 2.5 нс (при $R_{\text{max}} = 20$ мкм) до 25 нс (при $R_{\text{max}} = 200$ мкм), т.е. время схлопывания крупных пузырьков пересекается со временем выполнения условия $\max(\sigma_v) \leq \sigma_{0.2}$.

Таблица 1. Механические свойства при комнатной температуре алюминиевых сплавов [11]

Обработка	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Алюминиевый сплав АК4-1			
РКУП	540	560	6
РКУП + ИС	490	510	7
Т1	320	410	15
	270 [12]	400	13
Алюминиевый сплав АД33			
ИПДК	575	670	9
ИПДК + отжиг при 160°C	480	570	15
Т1	315	385	17

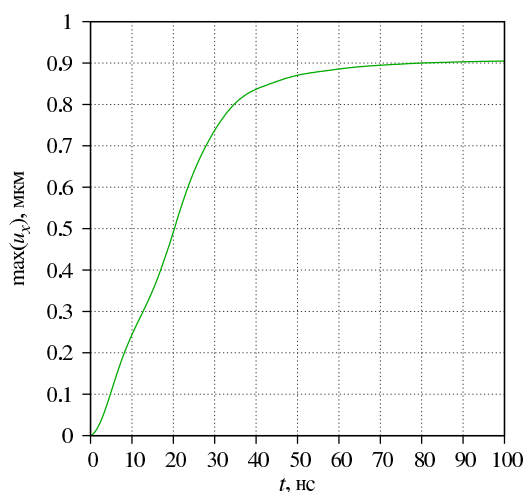


Рис. 2. Зависимость максимальной деформации u_x от времени t

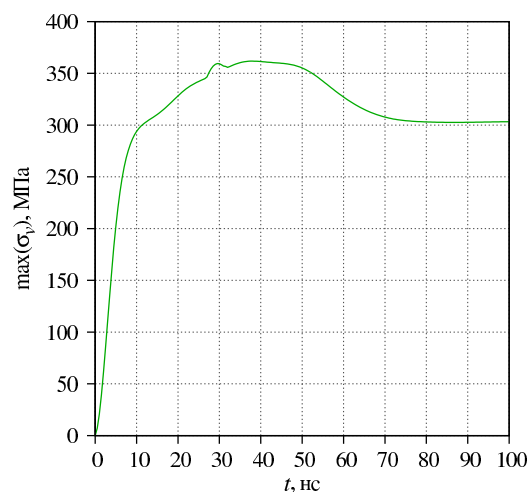


Рис. 3. Зависимость максимального эквивалентного напряжения σ_v от времени t

Рассмотрим распределения деформаций и напряжений с помощью расчетов стационарной задачи (2), тогда первый интеграл в вариационной формулировке (8) равен нулю. Расчеты показали что, как и в двумерной задаче, рассмотренной в работе [14], деформация локализована вблизи области, к которой приложена сила, на расстоянии порядка двух диаметров пузырька (т.е. деформации значительны на расстояниях $4R_b \approx 0.2$ мм). На рис. 4(а) показаны профили деформации для одиночного пузырька и двух пузырьков, схлопывающихся на различных расстояниях друг от друга. Возможность кавитационного разрушения поршня за счет превышения предела текучести при схлопывании пузырьков показана на рис. 4(б). Видно, что парное схлопывание пузырьков увеличивает эффективное напряжение в области воздействия на $\approx 15\%$. Максимум напряжений представляет собой круг с двойным диаметром одиночного пузырька; для пары пузырьков напряжения распределяются в виде суперпозиции двух окружностей с двойным диаметром пузырька и центрами в центрах схлопывающихся пузырьков.

Отметим, что в данной постановке не было учтено взаимодействие пузырьков, которое может привести как к интенсификации удара в области их совместного воздействия на поверхность, так и к смягчению их воздействия, в случае, когда их взаимодействие может изменить направление движений струй, в результате чего струи могут ударить не по жесткой поверхности, а по боковой поверхности пузырьков.

Поскольку уравнения равновесия (4) пропорциональны модулю Юнга E (т.к. коэффициенты

Ламе пропорциональны модулю Юнга), изменение E при упругих деформациях не влияет на взаимодействие поверхности и пузырька. Влияние коэффициента Пуассона ν для одиночного пузырька показано на рис. 5. При изменении коэффициента ν на -10% и $+10\%$ от значения $\nu_0 = 0.33$, перемещения u_x меняются на $-2,06\%$ и $+2,40\%$, а эквивалентные напряжения σ_v — на $-11,37\%$ и $+9,46\%$ соответственно, т.е. с ростом коэффициента Пуассона уменьшаются. Кроме того, область распространения напряжений становится более локальной.

Заметим, что напряжения фон Мизеса показывают эффективные напряжения (комбинация компонент тензора напряжения), позволяющие оценить переход деформаций от упругого характера к пластическому. Из условия равновесия (поверхность покоится) на поверхности возникают напряжения равные по величине и обратные по направлению к нормали плоскости, на которую приложено давление. На поверхности S_1 давление p компенсируется компонентой тензора напряжения σ_{xx} (рис. 6), причем абсолютное значение этой компоненты выше, чем эффективное напряжение σ_v , что может привести к механизму необратимых деформаций альтернативному пластическим деформациям: поскольку величина давления близка к значению предела текучести в обычных материалах, деформация поверхности поршня может произойти в случае, если область максимума напряжений попадет на границу зерен материала поршня (схлопывающийся пузырек может привести к разрыву связей между зернами, выбить зерно или несколько зерен, образовать на поверхности микротрещины). Обработка поверхности поршня [3, 11] для увеличения

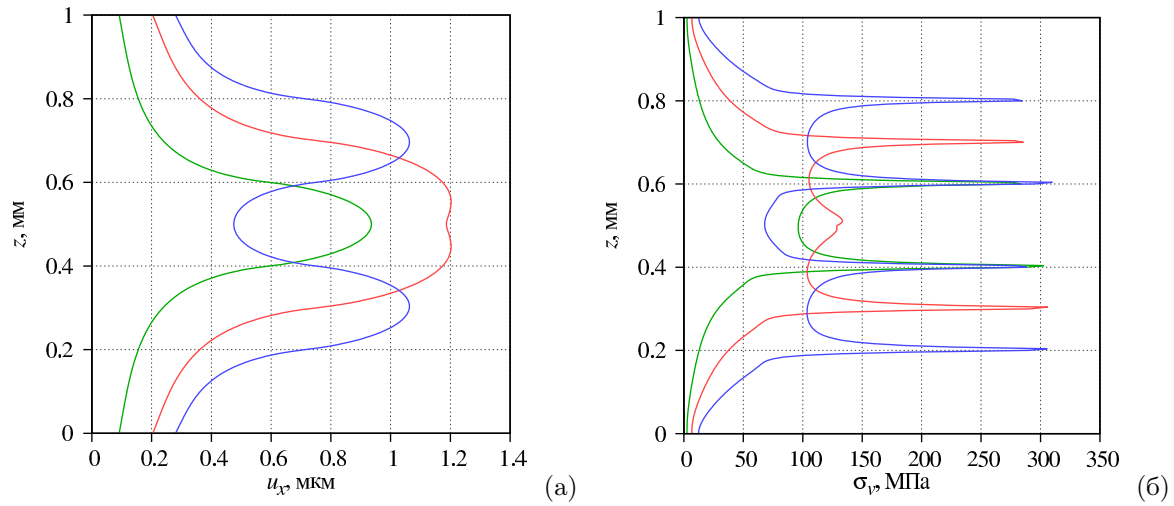


Рис. 4. Перемещение u_x (а) и эквивалентные напряжения σ_v (б) вдоль оси Oz ($y = L/2$) для одиночного пузырька с $z = L/2$ (зеленая линия); двух пузырьков с $z = L/2 - 2R_b$ и $z = L/2 + 2R_b$ (красная линия); двух пузырьков с $z = L/2 - 4R_b$ и $z = L/2 + 4R_b$ (синяя линия)

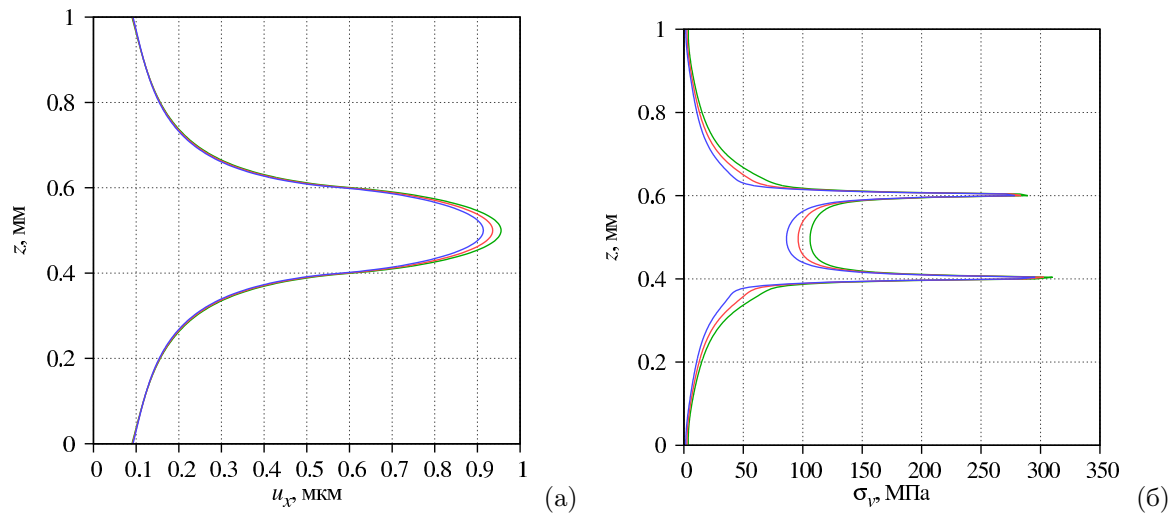


Рис. 5. Перемещение u_x (а) и эквивалентные напряжения σ_v (б) вдоль оси Oz ($y = L/2$) для одиночного пузырька с $z = L/2$ при $v = 0.9v_0$ (зеленая линия); $v = v_0$ (красная линия); $v = 1.1v_0$ (синяя линия)

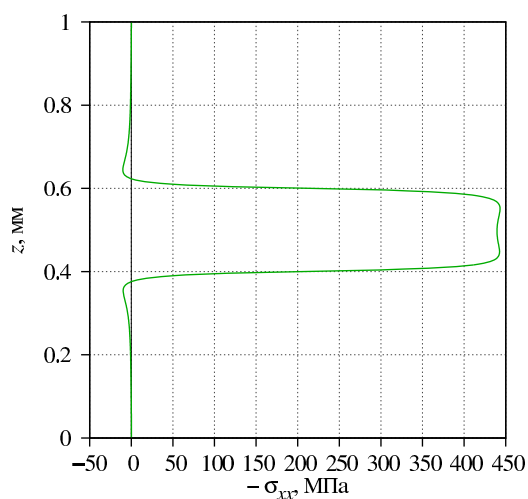


Рис. 6. Компонента напряжения σ_{xx} вдоль оси Oz ($x = 0, y = L/2$) для одиночного пузырька

предела текучести снижает вероятность необратимых деформаций.

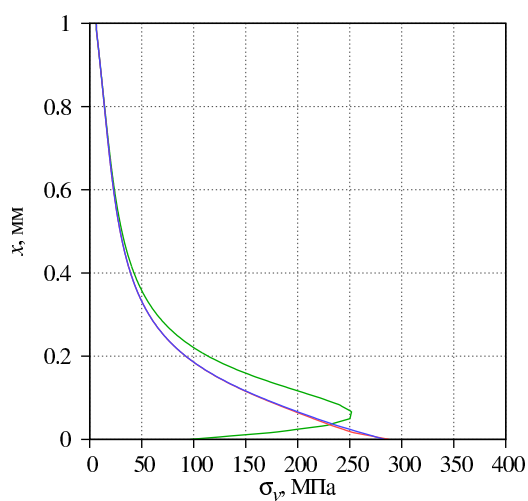


Рис. 7. Значения напряжений σ_v вдоль оси Ox ($y = L/2$) для одиночного пузырька: $z = L/2$ (зеленая линия), $z = L/2 - R_b$ (синяя линия), $z = L/2 + R_b$ (красная линия)

На рис. 7 показана зависимость эквивалентных напряжений σ_v от глубины x в области $y = L/2$ (центр приложенного давления) и положении максимальных напряжений на поверхности $z = L/2 - R_b$ и $z = L/2 + R_b$ (практически совпадают). Видно, что напряжения на расстоянии в R_b от центра быстро затухают, а в центре $z = L/2$ возрастают до глубины $0.05R_b$ и далее затухают, но значения напряжений в глубине образца не превышают максимальных значений на поверхности, следовательно,

необратимые деформации начинаются на поверхности поршня.

Следует отметить, что в данной работе проведена оценка возможности наступления пластических деформаций (достижения предела текучести), а сами пластические деформации не рассматривались. Как показано в работе [15] после достижения предела текучести при рассмотрении пластических деформаций от времени на поведение системы величина модуля Юнга будет иметь влияние.

4. Выводы

В работе было проведено численное трехмерное моделирование воздействия струйки, получаемой при кавитационном схлопывании пузырька, на поверхность поршня. Величина воздействия определялась из модели схлопывания несферического пузырька с образованием кумулятивной струйки. Исследовано воздействие как одиночного пузырька, так и пары пузырьков.

Расчет динамических уравнений для единичного пузырька показал, что максимум эквивалентных напряжений может превысить предел текучести алюминия без специальной обработки в промежуток времени схлопывания пузырьков большого радиуса.

Для определения пространственного распределения деформаций и напряжений решалась стационарная задача. Получено, что величина модуля Юнга на этапе достижения предела текучести не оказывает влияния на поверхность. Увеличение коэффициента Пуассона немного уменьшают величину деформаций, а эквивалентные напряжения уменьшаются пропорционально коэффициенту Пуассона. Парное схлопывание пузырьков на расстоянии порядка одного-двух диаметров пузырька увеличивает величину давления на поверхность, следовательно, имеет более высокий деформационный потенциал.

Таким образом, специальная обработка поверхности поршня повышает предел текучести, следовательно, уменьшает вероятность необратимых деформаций поршня. Необратимые деформации возникают на поверхности поршня в области границы приложенного давления струи, возникающей при схлопывании пузырька.

Список литературы

- [1] Большаков Г.В., Гулин Е.И., Торчиев Н.Н. Физико-химические основы применения моторных, реактивных и ракетных топлив. М.: Химия, 1965. 270 с.
- [2] Хватов Б.Н. Влияние состояния поверхностного слоя на кинетику кавитационного разрушения гид-

- ротурбинной стали // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 3. С. 507–512.
- [3] Патент на изобретение № 2550287, приоритет изобретения 30.12.2013 г. «Поршень с антикавитационной обработкой поверхности для устройства дозирования топлива», авторы: Урманчиев С.Ф., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В., Черникова М.А., Мурашкин М.Ю., Насибуллаев И.Ш.
- [4] Аганин А.А., Малахов В.Г., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А. Расчет силового воздействия кавитационного пузырька на упругое тело // Вестн. Тат. гос. гуманит.-пед. ун-та. 2010. № 4(22). С. 6–13.
- [5] Аганин А.А., Ильгамов М.А., Хисматуллина Н.А. Упруго-пластические деформации в теле при ударном воздействии кавитационного пузырька // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2013. Т. 155, кн. 2. С. 131–143.
- [6] Kornfeld M., Suvorov L. On the destructive action of cavitation // J. Appl. Phys. 1944. V. 15, No. 3. P. 495–497.
- [7] Lord Rayleigh. On pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // Philosophical Magazine. 1917. V. 34, No. 200. P. 94–98.
- [8] Кулагин В.А., Грищенко Е.П. Гидрогазодинамика [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
- [9] Маркушев М.В., Мурашкин М.Ю. Механические свойства субмикроструктурных алюминиевых сплавов после интенсивной пластической деформации угловым прессованием // ФММ. 2000. Т. 90, № 5. С. 92–101.
- [10] Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига. 2007. 398 с.
- [11] Денисова Е.В., Мурашкин М.Ю., Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Применение наноструктурных материалов в топливной автоматике // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 8. С. 47–52.
- [12] Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд. / М: Metallurgia. 1984. 528 с.
- [13] Hecht F. New development in FreeFem++ // J. Numer. Math. 2012. V. 20, no. 3–4. P. 251–265.
- [14] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Исследование чувствительности поверхности наноструктурного алюминиевого поршня к эрозийному разрушению // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов (20–24 августа 2015 г., Казань). Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 2733–2735.
- [15] Аганин А.А., Ильгамов М.А., Хисматуллина Н.А. Деформация поверхности тела при ударе водяной струи // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 3. С. 12–18.

Investigation of the cavitation stability of an aluminum piston surface based on a three-dimensional model

Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh.

Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

The problem of determining the optimal material for manufacturing the surface of a movable element (piston) is considered, which has an increased resistance to cavitation failure, in order to justify the expediency of using structural materials for the manufacture of pistons in fuel automatics elements. On the basis of three-dimensional numerical modeling of the elasticity equations, the conditions under which a cavitation bubble collapse on the surface of a piston made of various structural materials can lead to irreversible deformations of the piston. The pressure acting on the piston determined from the model of nonspherical bubble collapse with the formation of a cumulative stream. The impact on the surface of the collapse of both a single bubble and a pair of bubbles located at different distances from each other is studied. Calculations showed that with special treatment the surface of the piston will become more resistant to erosion destruction. Deformations are localized near the region to which the force is applied, at a distance of the order of two bubble diameters. Cavitation destruction of the material is associated with the yield threshold and grain size, is independent of the Young's modulus and inversely proportional to the Poisson's ratio. The simultaneous collapse of two bubbles at a distance of the order of one or two sizes of the bubble increases the maximum pressure on the surface and, consequently, increases the probability of irreversible deformation of the surface.

Keywords: bubble collapse, elastic deformation, yield stress, piston

