

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА ДЕФЛАГРАЦИИ В ДЕТОНАЦИЮ НА МЕДНУЮ ФОРСУНКУ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

М.-Ч. Гвак, Дж. Дж. Йох

Школа механического и аэрокосмического проектирования, Сеульский национальный университет  
151-742 Сеул, Республика Корея, jjooh@snu.ac.kr

Переход дефлаграции в детонацию сопровождается сильной волной давления, которая может неблагоприятно воздействовать на близлежащие элементы конструкции. Давление, создаваемое многократным детонационным импульсом, является достаточно сильным, чтобы вызвать поверхностную эрозию металла и скол края конструкции. В работе исследуется разрушительное воздействие детонации и на основе численного моделирования уравнений гидродинамики оценивается структурное повреждение медной форсунки угольного распыла в угольно-кислородной печи. Для совершенствования модели разрушения металлической форсунки при многократном воздействии детонационного импульса привлекаются экспериментальные данные.

Ключевые слова: переход дефлаграции в детонацию, детонационное воздействие, структурное повреждение, гидрокод.

### ВВЕДЕНИЕ

Горение распыляемого угля в кислороде имеет преимущества по сравнению с горением в воздухе, так как вызывает меньшее загрязнение окружающей среды и является более энергоэффективным процессом. Но вместе с тем использование чистого кислорода несет в себе определенную опасность, связанную с быстрым горением углеводородов, в результате чего пламя может перерасти в детонацию. Переход дефлаграции в детонацию (ПДД) — чрезвычайно сложный процесс, который включает в себя горение, ударные волны, отражения ударных волн, пограничные слои, а также взаимодействие этих факторов друг с другом. Поэтому механизм возникновения ПДД не всегда ясен в экспериментах и варьируется от случая к случаю. Основной характерной чертой ПДД является то, что для его возникновения необходимо ускорение пламени. Изучение этого процесса служит предпосылкой для понимания ПДД [1–3]. Процесс ускорения пламени включает: развитие условий турбулентного течения; взрыв во взрыве; развитие неустойчивости пламени. Известно три типа неустойчивости пламени: Рэлея — Тэйлора, Рихтмайера — Мешкова и Кельвина — Гельмгольца. В дан-

ном исследовании в основном рассматривается неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, которая возникает при взаимодействии ударной волны с поверхностью, разделяющей две среды различной плотности: сгоревшую и несгоревшую смесь [4].

Процессы ускорения пламени протекают одновременно и приводят к увеличению площади поверхности пламени, что соответственно увеличивает скорость химической реакции и количество выделяемой энергии. Помимо этого, ускорение пламени происходит за счет увеличения поверхности реакции при взаимодействии перечисленных выше механизмов. Столкновение фронтов пламени и отражение волн от препятствий или твердой подложки в печи сгорания также может вызвать ускорение пламени и тем самым способствовать процессу ПДД [5–7]. В [2, 5] численно показано, что взаимодействие пламени с ударной волной и с препятствием способствует формированию ПДД при горении газовых смесей (ацетилена, этилена и водорода). При горении распыленного угля к возникновению детонации приводит существенно более быстрое воспламенение угольной пыли в ударных и детонационных волнах по сравнению со статическими условиями [8].

При переходе дозвукового пламени в детонацию высокие значения давления и температуры могут быть определены из теории Рэнкина — Гюгонно. Импульсы высокого давле-

Min-Cheol Gwak, Jack J. Yoh.

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 599 Kwanak-ro, Kwanak-gu, 151-742 Seoul, Korea.

ния способны вызывать повреждение близлежащих конструкций. Типичным примером таких повреждений является стук в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием, когда одна или несколько порций горючей смеси взрываются за пределами огибающей нормального фронта горения. При этом давление в цилиндре резко возрастает, что приводит к его полному разрушению. Если горение среды обеспечивает достаточные условия для возникновения ПДД, то, как и при стуке в двигателе внутреннего сгорания, возможно последующее развитие повреждения структуры.

В настоящей работе рассматриваются структурные повреждения, вызванные волной детонации, возникающей при сгорании распыленного угля в кислороде. Выполнено численное моделирование разрушения форсунки при многократном воздействии импульса высокого давления, инициируемого в основной зоне горения при ПДД.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ФОРСУНКИ

Рассмотрим медную форсунку топливного сопла, представляющую собой коаксиальные трубки, через которые вдуваются распыляемый уголь и кислород. Исследуется структурное повреждение головки форсунки, выступающей в сторону зоны топливно-кислородного горения в угольной печи. Предполагается, что многократный ПДД-импульс провоцирует скол металла, что приводит к прекращению работы печи. Для верификации приведены данные об условиях работы печи, обсуждается возможность развития ПДД в соответствующем герметичном объеме. Для моделирования повреждений, вызванных ПДД, использовался гидрокод AUTODYN, позволяющий генерировать волну давления, которая обеспечивает сильное

импульсное воздействие, вызывающее эрозию и скол головки форсунки.

### 1.1. Эксплуатационные режимы топливно-кислородной печи

При работе топливно-кислородной печи использовался распыляемый уголь (питсбургский уголь) с диаметром частиц 50 мкм, частица включает в себя 32 % летучих и 68 % твердого углерода и золы. Форсунка вдувает кислород в рабочий канал печи через фурму: рабочий канал определяется как зона горения распыленного угля в кислороде. Примыкающая к форсунке стенка представляет собой наносной слой продуктов горения и шлака, играющий роль твердой подложки. Рассмотрим условия в рабочем канале печи.

Условия эксплуатации печи приведены в табл. 1. Рабочие параметры печи характеризуются высокими температурами и давлениями, что предполагает высокую вероятность возникновения ПДД. В табл. 2 перечислены факторы, способствующие возникновению ПДД в рабочем канале топливно-кислородной печи.

Таблица 1  
Рабочие параметры топливно-кислородной печи

Рабочий параметр	Значение
Окислитель	Кислород
Расход через фурму	2 300 м <sup>3</sup> /ч
Скорость в фурме	190 м/с
Температура	294 К
Скорость вдува распыляемого угля	40 м/с
Давление	4.8 бар
Температура пламени	3 373 К

Таблица 2  
Возможности ПДД в рабочем канале топливно-кислородной печи

Условия возникновения ПДД	Условия в рабочем канале
Турбулизация пламени	Высокая скорость в фурме (большие числа Re) и перемешивание распыляемого угля могут привести к образованию сильнотурбулентного пламени
Взрыв во взрыве	Вся рабочая зона является областью автовоспламенения в силу высоких значений температуры и давления. Возможно возникновение локальных взрывов (взрыв во взрыве)
Неустойчивость поверхности	Возможны перемешивание пламени и контакт с отраженной от стенки (как твердой подложки) ударной волной

Представленные данные подтверждают, что ПДД и детонация могут периодически возникать в печи, а сильная волна давления оказывать ударное воздействие на металлическую поверхность фурмы. Возникающая в процессе ПДД в печи детонационная волна распространяется со скоростью  $\approx 1.67$  км/с и характеризуется 25-кратным ростом давления [9, 10]. Исходя из этих известных условий и свойств детонации, на основе гидрокода моделируется повреждение медной форсунки, вызванное детонацией распыляемого угля. Здесь рассматривается эффект теплового размягчения материала, возникающий вследствие распределения высокой температуры вдоль выступающей головки фурмы. На рис. 1 показано расчетное поле температур в окрестности форсунки, полученное при условиях горения угля, представленных в табл. 1. Рост температуры, обусловленный тепловыделением реакции горения топлива в кислороде, оценивается с использованием кинетической схемы, приведенной в [11]. При этом температура головки форсунки выше температуры ее краев. Поэтому при равной интенсивности воздействия волны давления степень повреждения головки будет разной; центральная область форсунки способна перенести большую нагрузку вследствие эффекта теплового размягчения. С учетом свойств размягчения металла в моделировании определяется общее структурное повреждение форсунки импульсами высокого давления, равными по силовому воздействию детонационным волнам.

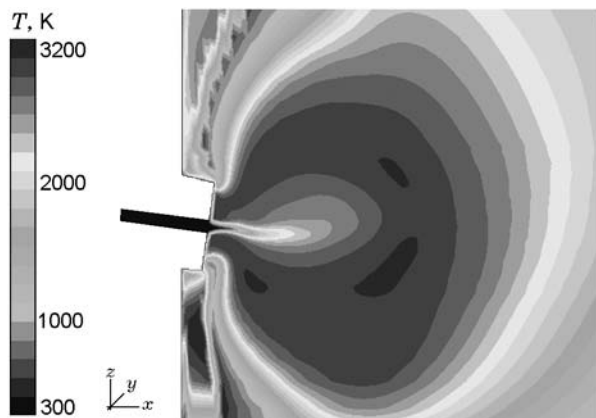


Рис. 1. Поле температур вокруг выступающей форсунки, рассчитанное по рабочим условиям топливно-кислородной печи (50 × 50 см)

## 1.2. Постановка задачи моделирования

Для моделирования динамики условного взрывчатого вещества применялся гидрокод AUTODYN. С учетом рассматриваемого угольно-кислородного окружения используются следующие уравнения сильногиперболической ударно-волновой динамики с начальными и граничными условиями в конечно-разностном виде [12]:

сохранение массы:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

сохранение импульса:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ji}}{\partial x_i} + \rho f_i, \quad (2)$$

сохранение энергии:

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - P \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + S_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

разложение тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - \delta_{ij} P, \quad (4)$$

уравнение состояния:

$$P = P(\rho, e), \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность,  $v_i$  — вектор скорости,  $\dot{q}$  — искусственная диссипация,  $f_i$  — внешняя сила,  $t$  — время,  $T$  — температура,  $P$  — давление,  $e$  — удельная внутренняя энергия,  $k$  — теплопроводность,  $S_{ji}$  — тензор напряжений. В задачах высокоскоростного разрушения присутствуют ударные волны, а математические разрывы такого рода являются известной причиной ложных осцилляций. Некоторый малый диссипативный член введен для подавления осцилляций на фронте ударной волны и поддержания гладкого решения вблизи разрыва в численном моделировании.

Моделирование в рамках гидрокода повреждения головки форсунки вследствие воздействия ПДД требует определения уравнения состояния и модели напряжения для медной форсунки. Энергия детонации, теоретическая скорость распространения и рост давления определяются в замкнутой камере. Моделирование состояния металла проводится с использованием уравнений состояния Гиллотсона [13], допускающих быстрый фазовый переход от начального состояния при сильном ударе. Затем применяется модель напряжений Стейнберга — Гуинана [14], позволяющая включить

в рассмотрение модули сдвига  $G$  и представить напряжения  $Y$  как функцию эквивалентных пластических деформаций, давлений и температур. При использовании модуля сдвига  $G$  напряжения  $S_{ji}$  связаны с деформациями  $\varepsilon_{ji}$  соотношением  $S_{ji} = 2G(1 + \nu)$ , где коэффициент Пуассона меди  $\nu$  задается равным 0.33. Величина  $Y$  ограничивает максимально допустимые напряжения меди и отмечает начало пластической деформации меди в данной модели. Кроме того, для экономии расчетного времени плавление и испарение представлены методом эрозии. Все эти представления необходимы для моделирования ударного воздействия на металл, приводящего к резкой деформации и мгновенному испарению металлической поверхности.

Запишем уравнения состояния Тиллотсона [13]:

$$P_1 = \left[ a + b \left( 1 + \frac{e}{e_0 \eta^2} \right) \right] \eta \rho_0 e + A\psi + B\psi^2 \quad (\eta > 1), \quad (6)$$

$$P_2 = \left[ a + b \left( 1 + \frac{e}{e_0 \eta^2} \right) \right] \eta \rho_0 e + A\psi \quad (\eta < 1, e \leq e_s), \quad (7)$$

$$P_3 = P_2 + (P_4 - P_2) \frac{e - e_s}{e_s^g - e_s} \quad (\eta < 1, e_s < e < e_s^g), \quad (8)$$

$$P_4 = a\eta\rho_0 e + \left[ \frac{b\eta\rho_0 e}{1 + e/(e_0\eta^2)} + A\psi \exp\left(\beta\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\right) \right] \exp\left(-\alpha\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^2\right) \quad (\eta < 1, e \geq e_s^g). \quad (9)$$

Здесь  $\eta = \rho/\rho_0$  — отношение плотностей,  $\psi = \eta - 1$ ,  $\rho_0 = 8.9 \text{ г/см}^3$ ,  $a = 0.5$ ,  $b = 1.5$ ,  $A = 139 \text{ ГПа}$ ,  $B = 110 \text{ ГПа}$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\beta = 5$ . Удельная внутренняя энергия полагается равной  $e_0 = 32.5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , а минимальная и максимальная удельные внутренние энергии, соответствующие точке испарения, принимаются равными  $e_s = 1.385 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $e_s^g = 35 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Выражение для давления выбирается из вышеприведенных уравнений соответственно значениям

объема и внутренней энергии. Модель напряжений Стейнберга — Гуинана [14] имеет вид:

$$Y = Y_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_0)]^n \left[ 1 + \left( \frac{Y'_P}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right], \quad (10)$$

$$G = G_0 \left[ 1 + \left( \frac{G'_P}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right], \quad (11)$$

$$Y_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_0)]^n = Y_{\max}, \quad (12)$$

$$\left( \frac{1}{Y_0} \frac{dY}{dP} \right)_0 \approx \left( \frac{1}{G_0} \frac{dG}{dP} \right)_0, \quad (13)$$

где  $\beta = 965$  и  $n = 0.1$  — переменные нагрузки,  $\varepsilon_0$  — начальные эквивалентные пластические деформации, обычно равные нулю. Принимается  $Y_0 = 0.42 \text{ ГПа}$ ,  $G_0 = 26.7 \text{ ГПа}$ ,  $Y_{\max} = 0.81 \text{ ГПа}$ ,  $Y'_P = 0.027$  — производная  $dY/dP$ ,  $G'_T = -16.45 \text{ МПа}$  — производная  $dG/dT$ ,  $G'_P = 1.74$  — производная  $dG/dP$ . Индекс 0 соответствует исходному состоянию ( $T = 300 \text{ К}$ ,  $P = 0$ ).

### 1.3. Начальные условия

После определения уравнений состояния и прочностной модели деформирования метал-

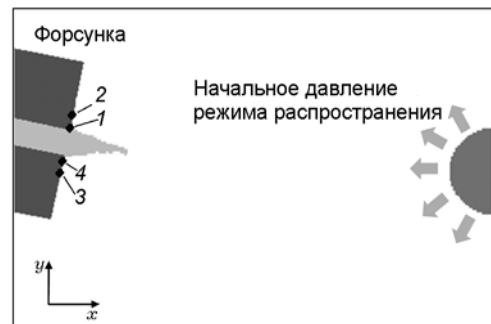


Рис. 2. Начальная постановка моделирования ПДД:

распространение волны (справа налево) отвечает (по давлению и температуре) детонации угольно-кислородной взвеси; 1-4 — датчики деформации, расположенные в четырех точках входного отверстия фурмы; расчетная область  $45 \times 30 \text{ см}$

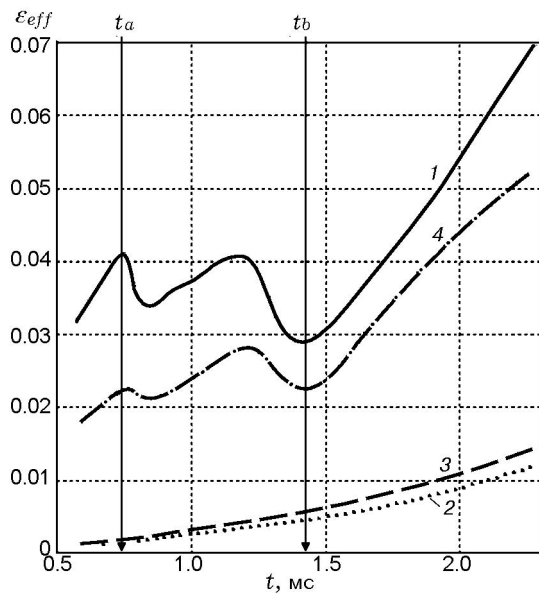


Рис. 3. Зависимость эффективных пластических деформаций от времени после первого импульса, приложенного в момент времени  $t_a$ : кривые 1–4 соответствуют измерениям в точках 1–4, указанных на рис. 2

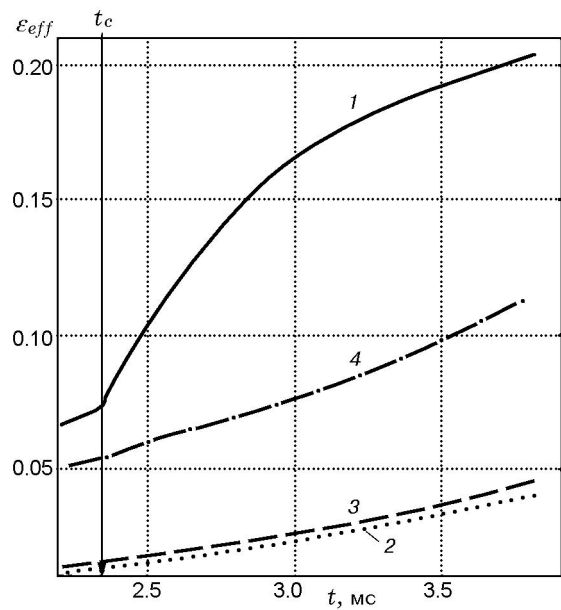


Рис. 4. Зависимость эффективных пластических деформаций от времени после второго импульса, приложенного в момент времени  $t_c$ : кривые 1–4 соответствуют измерениям в точках 1–4, указанных на рис. 2

ла, подверженного многократным воздействиям детонации, задаются рабочий канал и условия в нем для моделирования. Рабочее состояние зоны течения канала определено в табл. 1. На рис. 2 представлена расчетная область с указанием местоположения форсунки и направления инициированного импульса давления в печи. В соответствии с вышеуказанными условиями детонации (с 25-кратным ростом давления) рассматривается инициированная волна с

амплитудой 120 бар и скоростью распространения 1.67 км/с. Начальное значение давления в печи задается равным 4.8 бар, температуры — 1273 К. Скорость набегающего потока, моделирующего вдув распыленного в кислороде угля в расчетную зону, принята равной 190 м/с. Точки 1–4 указывают положения датчиков измерения деформаций.

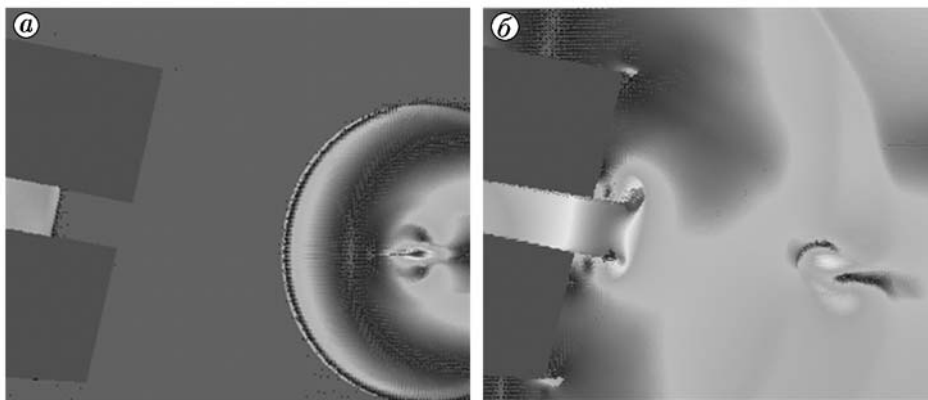


Рис. 5. Кадры распространения и отражения первой волны давления от головки форсунки

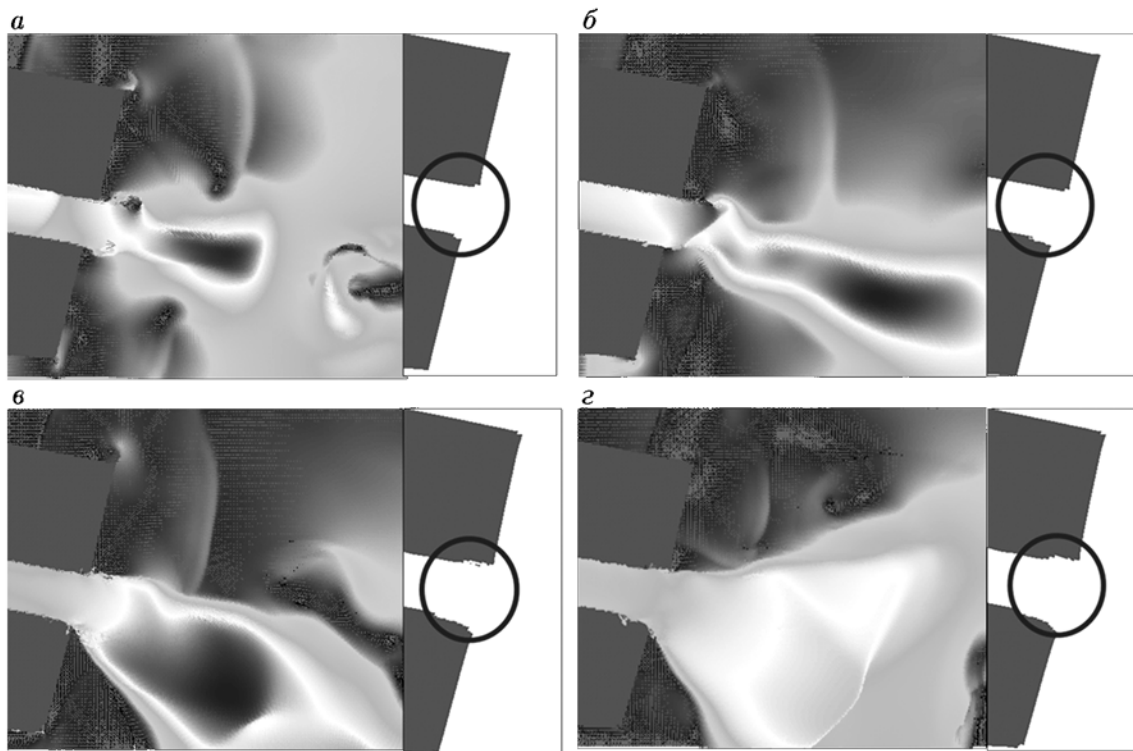


Рис. 6. Последовательность взаимодействия волн детонационного давления с форсункой: повторные ударные воздействия импульса на металлическую поверхность показаны в сравнении с формой форсунки после второго (а), третьего (б), четвертого (в) и пятого (г) импульсов

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 3 показаны изменения эффективных деформаций, определенные в четырех точках на головке форсунки. Волна давления воздействует на форсунку в момент времени  $t_a$ . С этого момента рост эффективных деформаций становится существенным. В момент  $t_b$  в точках 1 и 4 вблизи переднего края форсунки наблюдаются колебания эффективных деформаций, вызванные взаимодействием потока вдвухаемого кислорода с волной давления. Точки 1 и 4 расположены в области более высоких температур, чем другие точки на головке форсунки, и соответственно в них получены более высокие эффективные деформации; давление напрямую зависит от энергии (температуры) в силу уравнений (6), (7). Рис. 4 иллюстрирует повреждение форсунки под воздействием дополнительных волн давления. В момент  $t_c$  дополнительная волна давления воздействует на головку форсунки. Эффективные деформации 1 имеют скачок; деформации, полученные в точках 1 и 4, постепенно повышаются после момента времени  $t_c$ .

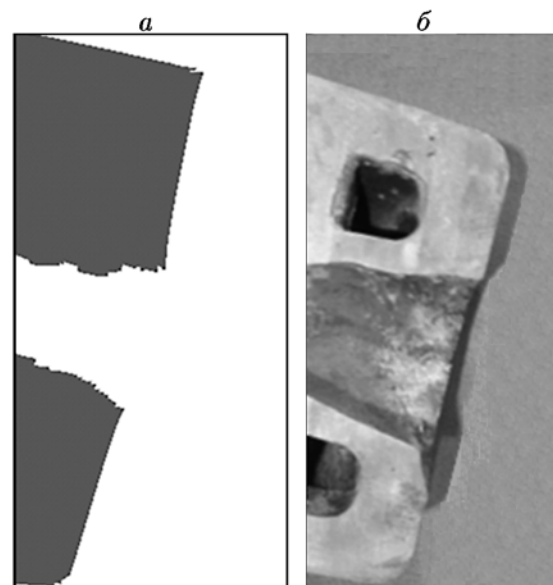


Рис. 7. Сравнение расчетных повреждений с экспериментом:

а — расчетная форма поверхности после воздействия шести детонационных импульсов, б — вид сбоку поврежденной части форсунки

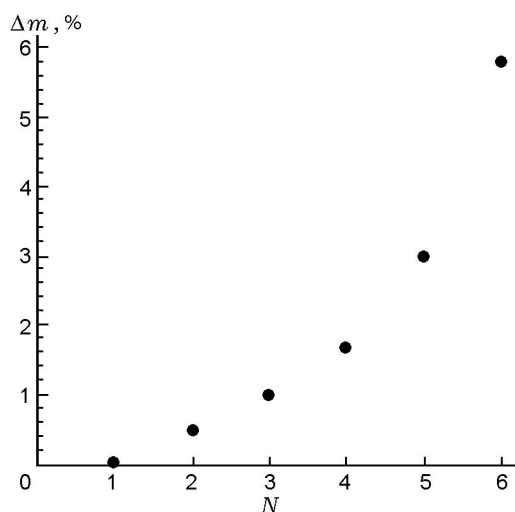


Рис. 8. Зависимость потери массы форсунки от числа импульсов давления

На рис. 5 и 6 приведены кадры распространения волны давления (поля скоростей) и расчетные картины формы поверхности форсунки. На рис. 5, *a* показана первая волна давления, движущаяся в направлении головки форсунки, на рис. 5, *b* — состояние потока в окрестности форсунки после отражения. В течение данного процесса повреждение головки форсунки описывается уравнениями состояния и моделью напряжений меди, подвергающейся импульсу высокого давления. Повреждение усиливается последующими дополнительными импульсами давления. На рис. 6 представлена деформация форсунки в результате воздействия последующих дополнительных импульсов. Картины на рис. 6, *a–g* отвечают второму, третьему, четвертому и пятому импульсам давления соответственно. На рис. 7 показана полученная моделированием поврежденная головка форсунки после воздействия последнего, шестого импульса давления в сопоставлении с фотографией реального повреждения форсунки. Зависимость относительных потерь массы  $\Delta m$  от числа детонационных импульсов  $N$  дана на рис. 8. Увеличение числа импульсов приводит к значительному повышению как пластических деформаций, так и потерь массы медной форсунки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен возможный механизм повреждений, обусловленных детонационными импульсами, нередко возникающими

ми в чугунных печах. Условия горения распыленного угля в угольно-кислородных печах способствуют возникновению процесса перехода дефлаграции в детонацию, который приводит к сокращению срока службы форсунки печи. Теоретически изучен процесс ускорения пламени, предшествующий переходу дефлаграции в детонацию. Выполнено численное моделирование повреждения форсунки при детонации в топливно-кислородной среде на основе расчета эффективных деформаций меди; при моделировании учитывались уравнения состояния, модель напряжений и соответствующие данные внешнего воздействия. Импульс давления детонации при сгорании распыленного угля в кислороде является достаточно сильным, чтобы вызвать эрозию металла и скол металлической головки, т. е. главной причиной повреждения форсунки является механическое ударное воздействие.

Авторы выражают благодарность POSCO, ADD и Hyundai Motors за поддержку через IAAT при Национальном университете Сеула.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Khokhlov A. M., Oran E. S., Thomas G. O.** Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition: the role of shock-flame interactions in turbulent flames // *Combust. and Flame*. — 1999. — V. 117. — P. 323–339.
2. **Oran E. S., Khokhlov A. M.** Deflagration, hot spots, and the transition to detonation // *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. — 1999. — V. 357. — P. 3539–3551.
3. **Ciccarelli G., Dorofeev S.** Flame acceleration and transition to detonation in ducts // *Prog. Energy. and Combust. Sci.* — 2008. — V. 34. — P. 499–550.
4. **Brouillette M.** The Richtmyer — Meshkov instability // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2002. — V. 34. — P. 445–468.
5. **Gamezo V. N., Ogawa T., Oran E. S.** Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: effect of obstacle spacing // *Combust. and Flame*. — 2008. — V. 155 — P. 302–315.
6. **Kuznetsov M., Ciccarelli G., Dorofeev V., Alekseev V., Yankin Y., Kim T. H.** DDT in methane-air mixtures // *Shock Waves*. — 2002. — V. 12. — P. 215–220.
7. **Hlushko S., Ciccarelli G.** Interaction of high-speed combustion front with a closely packed bed of spheres // *Shock Waves*. — 2008. — V. 18. — P. 317–327.
8. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Математическое моделирование гетерогенной детонации

- угольной пыли в кислороде с учетом стадии воспламенения // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 1. — С. 89–100.
9. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Математическое моделирование детонационных процессов в газозвеси частиц угля // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 103–112.
  10. **Эдвардс Д., Фернлей Р., Неттлтон М.** Исследование детонации взвесей угольной пыли в смесях кислорода с азотом в ударной трубе // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 2. — С. 129–136.
  11. **Watanabe H., Otake M.** Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier // Fuel. — 2006. — V. 85. — P. 1935–1943.
  12. **Tham C. Y.** Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D // Finite Elements in Analysis and Design. — 2005. — V. 41. — P. 1401–1410.
  13. **Katayama M., Takeba A., Toda S., Kibe S.** Analysis of jet formation and penetration by conical shaped charge with the inhibitor // Intern. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23. — P. 443–454.
  14. **Steinberg D. J., Cochran S. G., Guinan M. W.** A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // J. Appl. Phys. — 1980. — V. 51. — P. 1498–1504.

*Поступила в редакцию 1/IV 2010 г.,  
в окончательном варианте — 27/I 2011 г.*

---