

А.И. СНЕГИРЁВА
Д.А. КРЕТОВ

РАСЧЕТ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МАТРИЦЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

CALCULATION OF THE ADVANCED REINFORCED CONCRETE DIE UNDER IMPULSE LOADING

Приводится описание разработанной в рамках научно-практических работ авторов модели железобетонной матрицы для гидровзрывной штамповки. Для матрицы разработан метод расчета и составлены уравнения движения элементов конструкции для взрывной нагрузки. Проведен теоретический расчет конструкции в математической среде Mathcad. Полученные данные сопоставлены с ранее проведенными исследованиями. По результатам сравнения усовершенствованная конструкция матрицы менее подвержена деформированию, чем существующая модель. Показано, что предлагаемая конструкция матрицы отличается от существующих аналогов повышенной долговечностью.

Ключевые слова: кольцевые железобетонные матрицы, уравнения движения, импульсные нагрузки, гидровзрывная штамповка, бетон, твердеющий под давлением

В настоящее время в области производства летательных аппаратов распространено мелкосерийное производство отдельных элементов. Так как изготавливаемые детали имеют повышенные требования по точности и качеству, при их формообразовании рекомендовали себя взрывные способы штамповки.

Передающей средой для получения наиболее качественной детали лучше всего подходит водная среда, что подтверждается как расчетами [1], так и технологическими особенностями [2]. Для гидровзрывной штамповки изделий небольшими партиями экономически целесообразно использовать железобетонные матрицы из-за их дешевизны и относительной простоты изготовления.

Существенным недостатком использования железобетона при взрывных воздействиях является разрушение при многократно повторяющихся нагрузках. Одним из путей решения проблемы стало использование высокопрочного бетона. Повышенные прочностные характеристики достигались за счет твердения бетона под давлением.

В работе [3] рассмотрены опытные образцы железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки, представляющие собой толстостенный цилиндр высотой 200 мм и диаметром 426 мм. Матрицы имели внутреннее и наружное обрамление из металлических колец с заполнением пространства

The description of the model of reinforced concrete die for hydraulic stamping developed in the framework of scientific and practical work is provided. This invention differs from existing analogues in its increased durability. For the die the calculation method is developed and equations of motion of the structural elements for the explosive load are made up. A theoretical calculation of the structure in the mathematical environment of Mathcad is carried out. The obtained data are compared with earlier researches. By comparison the advanced die is less susceptible to deformation than the existing model. Thus the proposed die is more durable.

Keywords: annular reinforced concrete dies, equations of motion, impulse loading hydraulic stamping, concrete curing under pressure

между ними бетоном. Общий вид матрицы представлен на рис. 1.

В процессе твердения на свободную бетонную поверхность оказывали давление посредством прессы и специальной установки, разработанной А.И. Снегирёвой. Величина давления на бетон составляла порядка 50 кг/см².

Как показал эксперимент [4], элементы матрицы работают совместно только на первоначальном этапе деформирования. В дальнейшем наблюдается отделение наружного кольца с бетоном и внутрен-



Рис. 1. Общий вид кольцевой матрицы

него кольца друг от друга. Причем наибольшие радиальные деформации наблюдаются у наружного кольца с бетоном.

Эксперимент показал характер снижения работоспособности матрицы в зависимости от величины используемого заряда бризантных взрывчатых веществ. При линейном заряде 10 г/м образовывались трещины, но признаков разрушения бетона и остаточных деформаций от сжатия не обнаруживалось после 10 повторений нагружений. При величине заряда 20 г/м картина полностью повторялась. При 30 г/м после 10 загрузений проявились остаточные деформации во внутреннем металлическом кольце, что могло привести к нарушению допусков штампуемых деталей. При заряде 40 г/м ресурса матриц хватало только на две-три штамповки.

Для повышения долговечности разработана усовершенствованная конструкция железобетонной матрицы [5, 6]. Отличием от ранее существовавшей конструкции является наличие гидравлической камеры внутри конструкции матрицы. Она располагается между наружным металлическим кольцом

и массивом бетона. Это позволит создавать прессовочное давление на твердеющий бетон, не используя дорогостоящих прессов, а также гидравлическая камера позволит контролировать величину давления в ходе всего процесса штампования.

Кроме введения гидравлической камеры, новая конструкция матрицы отличается введением компенсационного слоя между внутренним металлическим кольцом и бетонным сектором. Данный слой представляет собой слой резины.

Для расчета полученной конструкции были составлены уравнения движения отдельных элементов и матрицы в целом при действии импульсной нагрузки. Составление уравнений и расчет осуществлялись при помощи математической вычислительной системы Mathcad. В связи с добавлением в конструкцию дополнительного промежуточного слоя, для решения системы уравнений вводится дополнительное уравнение движения компенсационного слоя. При этом за основу взята проверенная [3] математическая модель железобетонной кольцевой матрицы.

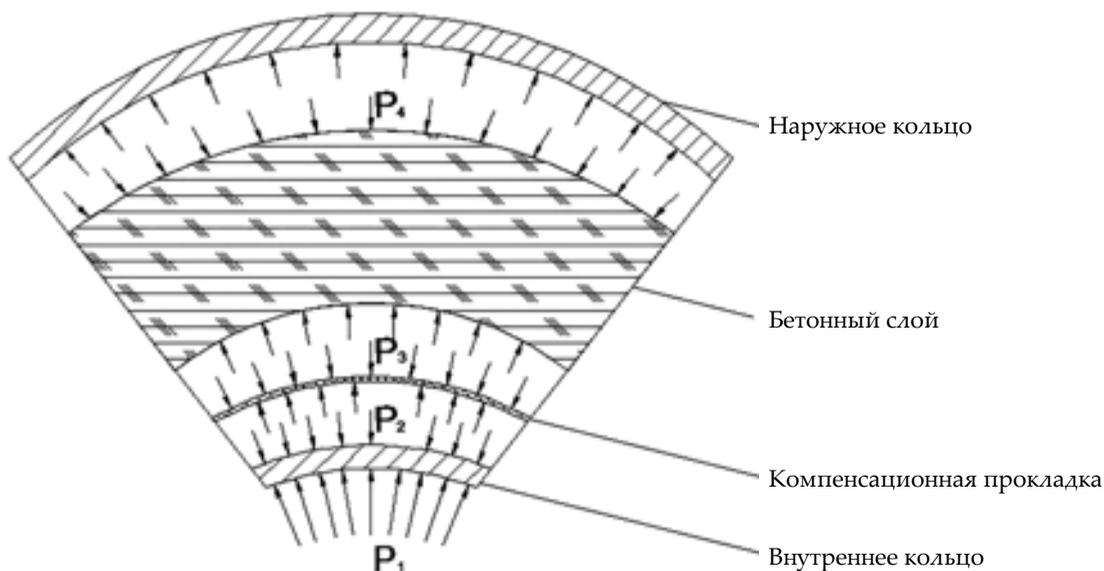


Рис. 2. Расчетная схема сектора железобетонной матрицы

Для внутреннего металлического кольца уравнение движения примет вид:

$$\delta_1 \cdot \rho_s \cdot y'' + \rho_0 \cdot C_0 \cdot y' + \frac{\delta_1 \cdot E_s}{R_B^2} \cdot y = P_1 - P_2, \quad (1)$$

где y'' – радиальное ускорение матрицы, м/с²;
 y' – радиальная скорость перемещения матрицы, м/с;
 y – радиальное перемещение матрицы, м;
 ρ_s – динамическая плотность металлического кольца, кг·с²/м⁴;
 δ_1 – толщина внутреннего металлического кольца, м;

ρ_0 – динамическая плотность водной среды, кг·с²/м⁴;
 C_0 – скорость распространения звука в водной среде, м/с;
 E_s – модуль упругости металлических колец, кг/м²;
 R_B – радиус внутреннего металлического кольца матрицы, м;
 P_1 – удельное равномерное давление на стенки внутреннего кольца, возникающее при взрывном воздействии, кг/м²;
 P_2 – удельное давление внутреннего металлического кольца на компенсационную прокладку, кг/м².

Давление P_1 возможно рассчитать по формуле

$$P_1 = 2 \cdot P_m \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (2)$$

где P_m – максимальное давление ударной волны, кг/м²;
 t – время с момента взрыва, с;
 θ – экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне, с.

Максимальное давление ударной волны P_m определяется по формуле Р. Коула [7] как для ударной волны, распространяющейся в воде при действии линейного заряда:

$$P_m = 857 \cdot \left(\frac{q^{0,5}}{R} \right)^{0,71}, \quad (3)$$

где q – погонный вес заряда, кг/м;
 R – расстояние от оси взрыва до внутреннего кольца матрицы, м.

Экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне показывает время, в течение которого давление падает в e раз:

$$\theta = 0,115 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0,5} \cdot \left(\frac{R}{q^{0,5}} \right)^{0,43}. \quad (4)$$

Для компенсационной прокладки уравнение движения примет вид:

$$\delta_2 \cdot \rho_2 \cdot y'' + \frac{\delta_2 \cdot E_2}{(R_B + \delta_1)^2} \cdot y = P_2 - P_3, \quad (5)$$

где δ_2 – толщина компенсационной прокладки, м;
 ρ_2 – динамическая плотность компенсационной прокладки, кг·с²/м⁴;
 E_2 – модуль упругости компенсационной прокладки, кг/м²;
 P_3 – удельное давление компенсационной прокладки на бетонный сектор, кг/м².

Бетонный сектор имеет следующее уравнение движения:

$$\delta_3 \cdot \rho_3 \cdot y'' = P_3 - P_4 \cdot \frac{R_H}{R_B}, \quad (6)$$

где δ_3 – толщина бетонного слоя, заключенного между наружным металлическим кольцом и компенсационной прокладкой, м;
 ρ_3 – динамическая плотность бетона, кг·с²/м⁴;
 R_H – радиус наружного металлического кольца матрицы, м;
 P_4 – удельное давление бетонного сектора на наружное металлическое кольцо, кг/м².

Для наружного металлического кольца уравнение движения примет вид:

$$\delta_4 \cdot \rho_s \cdot y'' + \frac{\delta_4 \cdot E_s}{R_H^2} \cdot y = P_4, \quad (7)$$

где δ_4 – толщина наружного металлического кольца, м.
 Подставим уравнения (1), (5), (7) с учетом (2), (3), (4) в (6) и запишем полученное уравнение в виде

неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$y'' + p_k \cdot y' + q_k \cdot y = T_k \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (8)$$

где p_k, q_k, T_k – коэффициенты неоднородного дифференциального уравнения второго порядка.

Коэффициенты можно найти из следующих уравнений:

$$p_k = \frac{C_0 \cdot \rho_0}{\delta_1 \cdot \rho_s + \delta_2 \cdot \rho_2 + \delta_3 \cdot \rho_3 + \delta_4 \cdot \rho_s \cdot \frac{R_H}{R_B}}, \quad (9)$$

$$q_k = \frac{\frac{E_s \cdot \delta_1}{R_B^2} + \frac{E_2 \cdot \delta_2}{(R_B + \delta_1)^2} + \frac{E_s \cdot \delta_4}{R_H \cdot R_B}}{\delta_1 \cdot \rho_s + \delta_2 \cdot \rho_2 + \delta_3 \cdot \rho_3 + \delta_4 \cdot \rho_s \cdot \frac{R_H}{R_B}}, \quad (10)$$

$$T_k = \frac{2 \cdot P_m}{\delta_1 \cdot \rho_s + \delta_2 \cdot \rho_2 + \delta_3 \cdot \rho_3 + \delta_4 \cdot \rho_s \cdot \frac{R_H}{R_B}}. \quad (11)$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения второго порядка (8) можно записать в виде:

$$y = e^{\alpha \cdot t} \cdot (C_1 \cdot \cos(\beta \cdot t) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot t)) + A \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (12)$$

где α, β, A – числовые коэффициенты,

$$\alpha = -\frac{p_k}{2}; \quad \beta = \sqrt{q_k - \left(\frac{p_k}{2} \right)^2}; \quad A = \frac{T_k}{\frac{1}{\theta^2} - \frac{p_k}{\theta} + q_k};$$

C_1, C_2 – постоянные, которые возможно определить из начальных условий:

$$C_1 = -A; \quad C_2 = \frac{A}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{\theta} + \alpha \right).$$

Подставляя значения C_1 и C_2 в уравнение (12), получаем:

$$y = A \cdot e^{\alpha \cdot t} \cdot \left(-\cos(\beta \cdot t) + \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{\theta} + \alpha \right) \cdot \sin(\beta \cdot t) + e^{-\left(\frac{1}{\theta} + \alpha \right) \cdot t} \right). \quad (13)$$

Для упрощения записи уравнения (13) воспользуемся формулой сложения гармонических колебаний (введение вспомогательного аргумента) при условии

$$M = \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{\theta} + \alpha \right);$$

$M \cdot \sin(\beta \cdot t) + (-1) \cdot \cos(\beta \cdot t) = \sqrt{M^2 + (-1)^2} \cdot \sin(\beta \cdot t + \varphi)$,
 где φ – вспомогательный аргумент.

Уравнение (13) примет вид:

$$y = A \cdot e^{\alpha \cdot t} \cdot \left(B \cdot \sin(\beta \cdot t + \varphi) + e^{-\left(\frac{1}{\theta} + \alpha \right) \cdot t} \right), \quad (14)$$

где $B = \sqrt{M^2 + (-1)^2}$.

При практических расчетах для максимальных перемещений величина $e^{-\left(\frac{1+\alpha}{\theta}\right)t}$ очень мала. Если ею пренебречь, выражение (14) примет вид:

$$y = A \cdot e^{\alpha t} \cdot B \cdot \sin(\beta \cdot t + \varphi). \quad (15)$$

Таким образом, полученное выражение (15) определяет радиальные перемещения матрицы под нагрузкой.

По полученным уравнениям были составлены графики изменения радиальных перемещений матрицы (рис. 3). График 1 отображает изменения радиальных перемещений для матрицы в целом и может быть использован для приближенного расчета.

Если рассматривать изменение величины удельного давления внутреннего металлического кольца на компенсационную прокладку (P_2), обнаруживается, что значения P_2 меняют знак. Это объясняется тем, что внутреннее кольцо в некоторый момент времени (при $P_2=0$) меняет направление и начинает перемещаться в обратную сторону. Таким образом, внутреннее кольцо отделяется от остальной части матрицы (бетонный сектор и наружное металлическое кольцо) и они далее совершают колебания самостоятельно. Поэтому для более точного расчета требуется знать уравнения изменения перемещений внутреннего кольца и наружного кольца с бетоном.

Перемещение внутреннего кольца можно найти из уравнения (1) в момент времени, когда $P_2 = 0$. Для наружного кольца потребуется решить совместно уравнения (5), (6) и (7) при $P_2 = 0$. Полученные графики представлены на рис. 3.

Для проверки правильности полученной математической модели, в расчетной среде Mathcad были записаны уравнения, приведенные в работе [3]. Результаты сравнения полученных радиальных

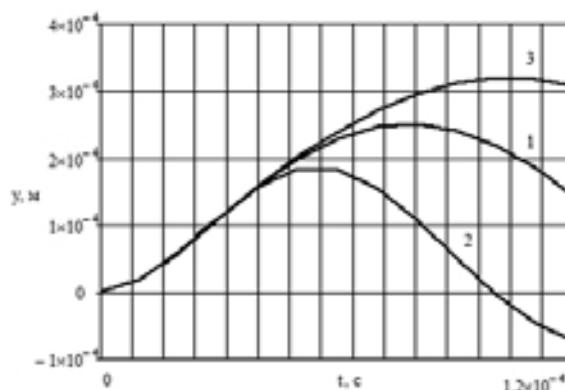


Рис. 3. Радиальные перемещения элементов матрицы (расчет в Mathcad):
1 – матрица в целом; 2 – внутреннее кольцо;
3 – наружное кольцо с бетоном

перемещений в среде Mathcad и при ручном расчете А.И. Снегирёвой показали высокую сходимость.

Используя уравнение (15), можно определить относительные деформации внутреннего и наружного металлических колец по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{y}{R_B}; \quad \varepsilon_2 = \frac{y}{R_H}. \quad (16)$$

По полученным данным были построены графики. На графике (рис. 4) [3] также были отмечены экспериментальные точки.

Сопоставляя полученные значения, видно, что математическая модель матрицы с компенсационным слоем меньше деформируется при взрывных воздействиях.

В настоящее время ведется изготовление опытных образцов матриц с компенсационным слоем для получения экспериментальных данных и сравнения с теоретическими предположениями.

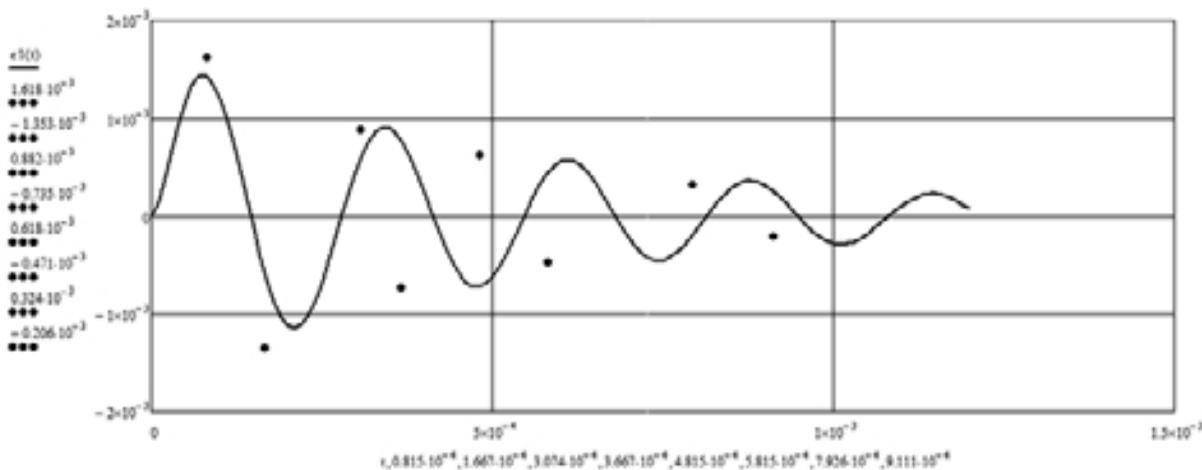


Рис. 4. Изменение относительных деформаций во времени

Вывод. Предложенная конструкция матрицы по теоретическим расчетам является более долговечной, чем существующие конструкции. Данный факт позволяет говорить об экономическом эффекте в случае необходимости изготовления изделий небольшими партиями или при экспериментальном производстве. Высокая сходимость расчетов, выполненных в Mathcad и в [3], подтверждает возможность использования данной математической модели для расчета усовершенствованных конструкций железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тлустенко С.Ф., Сытник В.А.* Формообразование деталей взрывными процессами по условиям точности сборки агрегатов летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №5 (36). С. 109-112.
2. *Степанов В.Г., Шафров И.А.* Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1975. 278 с.
3. *Снегирёва А.И.* Особенности работы железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки: дис. ... кандидата технических наук: 05.23.01. Самара, 1996. 127 с.
4. *Мурашкин Г.В., Снегирёва А.И.* Особенности определения долговечности железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора Селяева Владимира Павловича. Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2014. С. 81–88.
5. Патент РФ № 2016103420, 02.02.2016 / Анпилов С.М., Мурашкин В.Г., Мурашкин Г.В., Снегирёва А.И., Кретов Д.А. Взрывная камера // Патент России № 168925. 2017. Бюл. № 6.
6. Патент РФ № 2015153950, 12.12.2015 / Анпилов С.М., Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г., Снегирёва А.И., Кретов Д.А. Взрывная камера // Патент России № 2619545. 2017. Бюл. № 14.
7. *Коул Р.* Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 495 с.

Об авторах:

СНЕГИРЁВА Антонина Ивановна

кандидат технических наук, профессор,
заведующая кафедрой строительства
Филиал Самарского государственного технического
университета в г. Белебее Республики Башкортостан
452000, Россия, Республика Башкортостан,
г. Белебей, ул. Советская, 11,
тел. (34786) 5-16-06
E-mail: A.I.Snegireva@gmail.com

КРЕТОВ Дмитрий Александрович

аспирант кафедры теории сооружений
и строительных конструкций
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,
тел. (8452) 99-87-84
E-mail: kretdima@rambler.ru

SNEGIREVA Antonina I.

PhD in Engineering Science, Professor,
Head of the Construction Chair
Samara State Technical University
Belebeey branch (Republic of Bashkortostan)
452000, Russia, Republic of Bashkortostan,
Belebeey, Sovetskaya str., 11,
tel. +7(34786) 5-16-06
E-mail: A.I.Snegireva@gmail.com

KRETOV Dmitry

Post-graduate Student of the Theory of Structures
and Building Construction Chair
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin
410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya str., 77,
tel. +7(8452)99-87-10
E-mail: kretdima@rambler.ru

Для цитирования: *Снегирёва А.И., Кретов Д.А.* Расчет усовершенствованной железобетонной матрицы при импульсном нагружении // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №4. С. 20-24. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.4.
For citation: *Snegireva A.I., Kretov D.A.* Calculation of the advanced reinforced concrete die under impulse loading // Urban construction and architecture. 2017. V.7, 4. Pp. 20-24. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.4.