УДК 539.31

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОВОЧНОГО МОЛОТА

[1]Санкин Ю.Н., [2]Юганова Н.А.

[1]Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, e-mail: yns@ulstu.ru;
[2]Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова, Ульяновск, e-mail: yuganov_vs@mail.ru

В статье поставлена задача математического моделирования ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой сложной вязкоупругой стержневой системой с распределенными параметрами, соударяющейся с препятствием. Для решения поставленной задачи используется частотный метод, представляющий собой модификацию метода конечных элементов, основанного на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента. Заготовка моделируется телом Максвелла. Применение предлагаемого подхода позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния в любом интересующем сечении рабочих частей молота, а также дает возможность проводить вариантные расчеты с целью совершенствования конструкции ковочных молотов. В работе получены следующие результаты: – разработана математическая модель ковочного молота для оценки ударного взаимодействия с заготовкой; – найдены значения коэффициентов тела Максвелла, моделирующих заготовку при ковке; – даны предложения по улучшению конструкции штока ковочного молота в виде стержня с отверстиями ступенчато-переменного сечения, повышающие его надежность при ковке.

Ключевые слова: метод конечных элементов, тело Максвелла, частотный метод, расчет ковочных молотов

FREQUENCY METHOD OF CALCULATION OF THE FORG HAMMER

[1]Sankin Y.N., [2]Yuganova N.A.

[1]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, e-mail: yns@ulstu.ru;
[2]Ulyanovsk Stat Pedagogical University, Ulyanovsk, e-mail: yuganov_vs@mail.ru

In this paper the task of mathematical modeling in the process of forging hammer shock interaction with the procurement of complex viscoelastic rod system with distributed parameters, colliding with the obstacle. To solve this problem, we use the frequency method, which is a modification of the finite element method, based on a precise integration of the differential equations for finite element. Harvesting simulated body Maxwell. Application of the proposed approach allows for the calculation of the stress-strain state in any section of interest to the working parts of the hammer, and also makes it possible to carry out variant calculations in order to improve the design of hammers. We obtain the following results: – Developed a mathematical model to estimate the forging hammer shock interaction with the workpiece; – The values of the coefficients of the Maxwell body, simulating the workpiece during forging; – Suggests ways to improve the design of the rod forging hammer in the form of a rod with holes stepped-section, more reliable during forging.

Keywords: a method of final elements, Macswell body, frequency method, calculation of forg hammers

При исследовании надежности и долговечности деталей и узлов ковочных молотов возникает необходимость в определении действующих нагрузок.

Падающие части ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой можно моделировать сложной вязкоупругой стержневой системой с распределенными параметрами, соударяющейся с препятствием. Применение предлагаемого подхода позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния в любом интересующем сечении рабочих частей молота, а также дает возможность проводить вариантные расчеты с целью совершенствования конструкции ковочных молотов.

Для решения поставленной задачи используем частотный метод динамического расчета нестационарных колебаний ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой. Предлагаемая методика использует модификацию метода конечных элементов (МКЭ), основанную на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента [2], и позволяет рассчитывать продольные и поперечные колебания стержней ступенчато-переменного сечения с учетом или без учета рассеяния энергии при соударении с жестким препятствием [3, 6].

Для учета упругого рассеяния энергии согласно Сорокину С.Е. [4] для частотно-независимого трения все характеристики упругости системы заменять комплексными величинами, в данном случае:

$$\bar{E} = E\left(1 + i\gamma_1\right); \quad \bar{C} = C\left(1 + i\gamma_2\right);$$

$$\bar{G} = G\left(1 + i\gamma_3\right); \quad \bar{\xi} = \xi\left(1 + i\gamma_4\right),$$

где γ – коэффициент сопротивления.

Для заготовки, обладающей одновременно упругостью, вязкостью и пластичностью в различных формах и соотношениях и моделируемой элементом Максвелла, учет рассеяния энергии будем осуществлять согласно [5]:

$$\bar{E} = E\,\frac{t_{M1} i\omega}{1 + t_{M1} i\omega}.$$

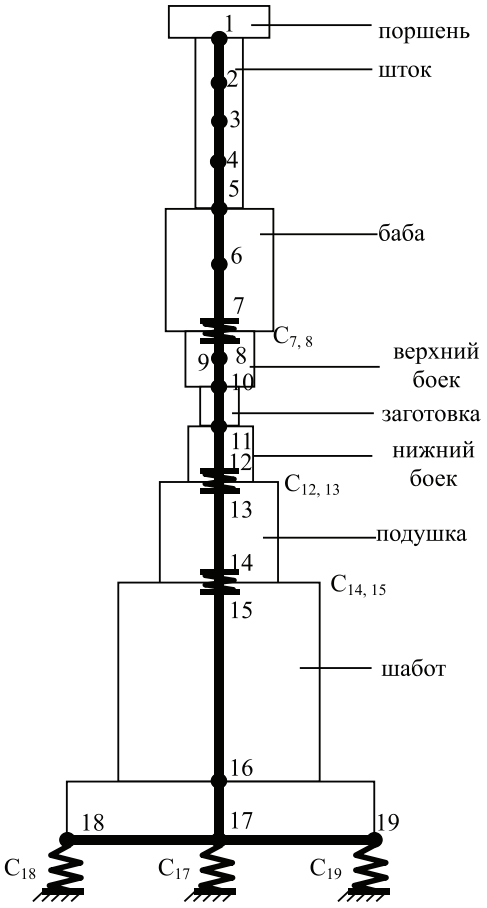


Рис. 1. Расчетная схема молота М1345: 1 – 19 – узлы системы; $C_{7,8}$, $C_{12,13}$, $C_{14,15}$ – жесткости пружин

Коэффициент t_M определяется экспериментальным путем.

Рассмотрим паровоздушный ковочный молот арочного типа модели М1345. Принципиальная схема молота показана на рис. 1.

Основные параметры и размеры молота М1345 приняли для расчета согласно ГОСТ 9752-75. При составлении расчетной схемы молота считалось, что в штоке, бабе, бойках, подушке и верхней части шабота возникают продольные колебания, а в основании шабота – поперечные.

Таким образом, расчетная схема ковочного молота (см. рис. 1) будет состоять из 19 узлов.

Участки 7–8, 12–13 и 14–15 моделируют стыки. Методика расчета контактных деформаций стыков с учетом реальных условий заимствована из работы [1]. Узлы 17, 18 и 19 имеют упругое основание, заменяющее влияние подкладки из дубовых брусьев. Подкладка под шаботом, состоящая из дубовых брусьев, моделируется упругим основанием с сосредоточенной жесткостью в соответствующих узлах системы. На завершающей стадии удара верхний боек считается присоединившимся к заготовке.

Предлагаемой расчетной схеме (см. рис. 1) соответствует следующая система разрешающих уравнений для построения амплитудно-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) перемещений:

$$(S_{1,2} - m\omega^2)W_1 - T_{1,2}W_2 = -T_{1,2}\left[u_2\right];$$

для j = 2, 3, 4, 5, 6, 9:

$$-T_{j-1,j}W_{j-1} + (S_{j-1,j} + S_{j,j+1})W_j - T_{j,j+1}W_{j+1} = -T_{j-1,j}\left[u_{j-1}\right] - T_{j,j+1}\left[u_{j+1}\right];$$

$$-T_{6,7}W_6 + S_{6,7}W_7 + c_{7,8}(W_7 - W_8) = -T_{6,7}\left[u_6\right];$$

для j = 8, 13: ;

$$S_{j,j+1}W_j + c_{j-1,j}(W_j - W_{j-1}) - T_{j,j+1}W_{j+1} = -T_{j,j+1}\left[u_{j+1}\right];$$

$$S_{15,16}W_{15} + c_{14,15}(W_{15} - W_{14}) - T_{15,16}W_{16} = 0;$$

для j = 10, 11,12, 14, 16:

$$-T_{j-1,j}W_{j-1} + (S_{j-1,j} + S_{j,j+1})W_j - T_{j,j+1}W_{j+1} = 0;$$

$$-T_{16,17}W_{16} + (S_{16,17} + G_{17,18} + G_{17,19} + c_{17})W_{17} - H_{17,18}W_{18} +$$

$$+D_{17,18}\phi_8 - H_{17,19}W_{19} + D_{17,19}\phi_9 = 0;$$

$$-H_{17,18}W_{17} + (G_{17,18} + c_{18})W_{18} - K_{17,18}\phi_{18} = 0;$$

$$D_{17,18}W_{17} - K_{17,18}W_{18} + A_{17,18}\phi_{18} = 0;$$

$$-H_{17,19}W_{17} + (G_{17,19} + c_{19})W_{19} + K_{17,19}\phi_{19} = 0;$$

$$-D_{17,19}W_{17} - K_{17,19}W_{19} + A_{17,19}\phi_{19} = 0,$$

где $$A_{nk} = i_{nk}\, a_{nk}\,;\;\; i_{nk} = \frac{E_{nk}\, J_{nk}}{l_{nk}};\;\; \lambda_{nk} = l_{nk} \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu_{nk} \cdot \omega^2}{E_{nk} \cdot J_{nk}}}\,;\;\; K_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}}\, k_{nk};$$

$$\frac{1}{t_{nk}} = 1 - \cos\lambda_{nk} \cdot \mathrm{ch}\lambda_{nk};\quad D_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}}\, d_{nk};\qquad G_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2}\, g_{nk};\qquad H_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2}\, h_{nk};$$

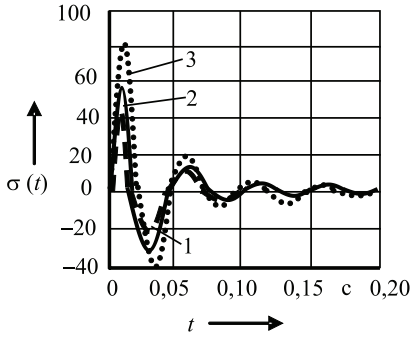
$$a_{nk} = \left(\sin\lambda_{nk} \cdot \mathrm{ch}\lambda_{nk} - \mathrm{sh}\lambda_{nk} \cdot \cos\lambda_{nk}\right) \cdot \lambda_{nk} \cdot t_{nk};$$

$$k_{nk} = sh\lambda_{nk} \cdot \sin\lambda_{nk} \cdot \lambda_{nk}^2 \cdot t_{nk};\;\; d_{nk} = \left(ch\lambda_{nk} - \cos\lambda_{nk}\right) \cdot \lambda_{nk}^2 \cdot t_{nk};$$

$$h_{nk} = \left(\sin\lambda_{nk} + sh\lambda_{nk}\right) \cdot \lambda_{nk}^3 \cdot t_{nk};\;\; g_{nk} = \left(\sin\lambda_{nk} \cdot ch\lambda_{nk} + sh\lambda_{nk} \cdot \cos\lambda_{nk}\right) \cdot \lambda_{nk}^3 \cdot t_{nk},$$

где j – номер узла (i = 1,2…19); W_j – перемещение j-го узла, м; φ_j – угол поворота j-го узла, рад; c_j – жесткости пружин, моделирующих упругое основание *в j-ом* узле, кг/м; c_{nk} – жесткости пружин, моделирующих стыки *nk*, кг/м.

Из системы разрешающих уравнений находятся изображения перемещений $U(\omega)$ в узлах системы. Для получения переходного процесса используется дискретное преобразование Фурье. В ходе исследований выявлен информативный диапазон частот (рис. 2), позволяющих идентифицировать получаемые АФЧХ, который составил ω = (0–400) с$^{-1}$.



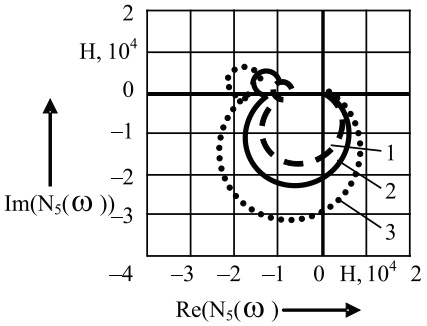


Рис. 2. Влияние скорости соударения V на напряжение σ(t) и АФЧХ усилий в 5 узле $N_5(\omega)$ заготовки из стали 45; 1, 2, 3 – соответственно V = 4, 5, 7 м/с

Теоретические исследования показали, что на напряжения, возникающие в различных узлах системы при соударении падающих частей с заготовкой, влияют скорость соударения, материал и размеры поковки (см. рис. 2).

Установлено, что максимальные напряжения, в несколько раз превышающие напряжения в других узлах системы, возникают в месте заделки штока в бабу (5 узел), что подтверждает предварительные сведения из практики о подавляющем числе поломок именно в этом сечении.

Предлагается следующий путь уменьшения нагрузок, возникающих в месте заделки штока в бабу. Можно распределить нагрузку на несколько сечений. Для этого следует в качестве новой конструкции штока использовать шток с цилиндрическими отверстиями ступенчато-переменного сечения (рис. 3). Предлагаемые изменения в конструкции штока снижают возникающие в месте заделки штока в бабу напряжения на (18–20)% и направлены на повышение надежности штоков, что позволяет увеличить срок их эксплуатации и тем самым сократить материальные потери от замены штоков и от простоя оборудования в период их замены (рис. 3).

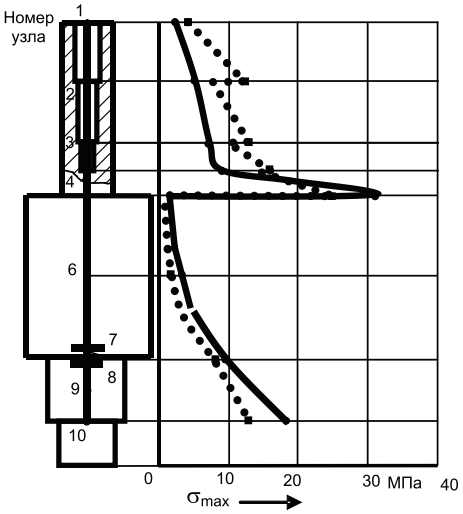


Рис. 3. Распределение напряжений в падающих частях ковочного молота: сплошная линия – для штока постоянного сечения, пунктирная линия – для штока с цилиндрическими отверстиями ступенчато-переменного сечения

Для проверки предлагаемой методики расчета ковочных молотов были проведены экспериментальные исследования в кузнечно-штамповочном производстве ЗАО «АВИАСТАР-СП» (г. Ульяновск), результаты которых показали, что средняя погрешность вычислений составляет 14 % для частот собственных колебаний и 25 % – для амплитуд колебаний (рис. 4).

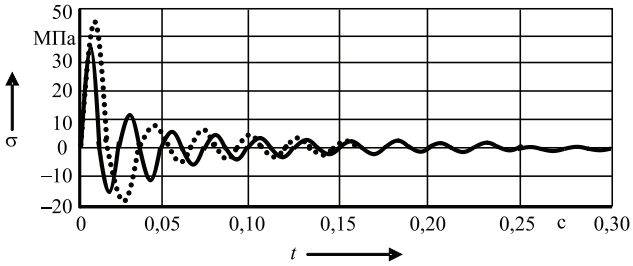


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных амплитуд напряжений σ в месте заделки штока в бабу (заготовка – сталь 45, V = 4 м/с), где сплошная линия – экспериментальная кривая, пунктирная линия – теоретическая кривая

Применение предлагаемого подхода позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния в любом интересующем сечении рабочих частей молота, а также дает возможность проводить вариантные расчеты с целью совершенствования конструкции ковочных молотов.

Выводы

1. Разработана математическая модель ковочного молота для оценки ударного взаимодействия с заготовкой.
2. Найдены значения коэффициентов тела Максвелла, моделирующих заготовку при ковке.
3. Даны предложения по улучшению конструкции штока ковочного молота в виде стержня с отверстиями ступенчато-переменного сечения, повышающими его надежность при ковке.

Список литературы

1. Левина З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 267 с.

2. Санкин Ю.Н. Динамические характеристики вязкоупругих систем с распределенными параметрами. – Саратов: изд-во СГУ, 1977. – 309 с.

3. Санкин Ю.Н. Продольные колебания упругих стержней ступенчато-переменного сечения при соударении с жёстким препятствием / Ю.Н. Санкин, Н.А. Юганова // Прикладная математика и механика. – М.: Изд-во «Наука», 2001. – Т. 65. Вып. 3. – С. 444–450.

4. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. – М.: Гостройиздат, 1960. – 131 с.

5. Фрейденталь А. Математические теории неупругой сплошной среды / А. Фрейденталь, Х. Гейрингер. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.

6. Sankin Y.N. Longitudinal vibrations of elastic rods of step-variable cross-section colliding with rigid obstacle \ Y. N. Sankin and N.A. Yuganova, J.Appl. Maths Mechs, Vol.65, No 3, pp. 427 – 433, 2001.

References

1. Levina Z.M. Kontaktnaja zhestkost mashin / Z.M. Levina, D.N. Reshetov. M.: Mashinostroenie, 1971. 267 p.

2. Sankin J.N. Dinamicheskie harakteristiki vjazko-uprugih sistem s raspredelennymi parametrami. Saratov: izd-vo SGU, 1977. 309 p.

3. Sankin J.N. Prodol'nye kolebanija uprugih sterzhnej stupenchato-peremennogo sechenija pri soudarenii s zhjostkim prepjatstviem / J.N. Sankin, N.A. Juganova // Prikladnaja matematika i mehanika. M.: Izd-vo «Nauka», 2001. Tom 65. Vyp. 3. pp. 444–450.

4. Sorokin E.S. K teorii vnutrennego trenija pri kolebanijah uprugih sistem / E.S. Sorokin. M.: Gostrojizdat, 1960. 131 p.

5. Frejdental A. Matematicheskie teorii neuprugoj sploshnoj sredy / A. Frejdental, H. Gejringer. M.: Fizmatgiz, 1962. 349 p.

6. Sankin Y.N. Longitudinal vibrations of elastic rods of step-variable cross-section colliding with rigid obstacle \ Y.N. Sankin and N.A. Yuganova, J.Appl. Maths Mechs, Vol.65, no 3, pp. 427–433, 2001.

Рецензенты:

Лебедев А.М., д.т.н., доцент, профессор Ульяновского высшего авиационного училища (института), г. Ульяновск;

Дмитриенко Г.В., д.т.н., профессор Ульяновского высшего авиационного училища (института), г. Ульяновск.

Работа поступила в редакцию 13.11.2012.