

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ЗАГОТОВКИ ПРИ КОВКЕ

¹Санкин Ю.Н., ²Юганова Н.А.

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, e-mail: yns@ulstu.ru;

²Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова,
Ульяновск, e-mail: yuganov_vs@mail.ru

В статье рассмотрена задача моделирования заготовок ковочных молотов в виде вязкоупругого тела Максвелла, испытывающего ударные нагрузки. Построена математическая модель заготовки, частотным методом получена оценка осадки заготовки при ковке, позволяющая назначать безопасные технологические режимы. Для решения поставленной задачи использована модификация метода конечных элементов, основанная на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента, позволяющая рассчитывать продольные и поперечные колебания стержней ступенчато-переменного сечения с учетом или без учета рассеяния энергии при соударении с жестким препятствием. В работе получены следующие результаты: построена математическая модель заготовки ковочного молота в виде тела Максвелла; выполнена проверка адекватности построенной математической модели, путем сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными; получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Погрешность расчетов составила 5%.

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

LINEAR MODEL OF THE BLANK IN FORGING

¹Sankin Y.N., ²Yuganova N.A.

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, e-mail: yns@ulstu.ru;

²Ulyanovsk Stat Pedagogical University, Ulyanovsk, e-mail: yuganov_vs@mail.ru

In this paper we consider the problem of modeling blanks forging hammers as Maxwell viscoelastic body, experiencing shock. A mathematical model of the workpiece, using an estimate of the frequency precipitation billet forging, allows you to assign a safe operating practices. To solve this problem used a modification of the method of finite elements, based on the precise integration of the differential equations for finite element, allows to calculate longitudinal and transverse vibrations of rods stepped-section with or without consideration of energy dissipation in a collision with a rigid barrier. We obtain the following results: a mathematical model of the workpiece forging hammer as a body of Maxwell; completed the validation of the constructed mathematical model, by comparing the theoretical calculations with experimental data; the good agreement between theoretical and experimental results. Error calculation was 5%.

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

При исследовании надежности и долговечности деталей и узлов молота возникает необходимость в определении действующих нагрузок. Прочность деталей молота, качественные показатели этой машины зависят от силы сопротивления поковки деформированию. Доказано, что динамический расчет падающих частей ковочного молота без учета деформации поковки совершенно недопустим [1, 8].

подавляющее большинство заготовок перед дальнейшей ковкой проходит операцию осадки, при которой в результате продольного удара увеличивается площадь поперечного сечения заготовки за счет уменьшения ее высоты.

Высокие уровни нагружения вызывают в заготовках ковочных молотов значительные деформации, материал частично теряет упругие свойства: при разгрузке его первоначальные размеры и форма полностью не восстанавливаются, а при полном снятии внешних нагрузок фиксируются остаточные деформации, которые и составляют осадку. Т.е. в заготовках имеют место вязкоупругие деформации.

Таким образом, падающие части ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой можно моделировать сложной вязкоупругой стержневой системой с распределенными параметрами, соударяющейся с препятствием. В качестве математической модели предполагается принять разогретую заготовку в виде вязкоупругого тела Максвелла.

Для решения поставленной задачи используем модификацию метода конечных элементов (МКЭ), основанную на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента [3], позволяющую рассчитывать продольные и поперечные колебания стержней ступенчато-переменного сечения с учетом или без учета рассеяния энергии при соударении с жестким препятствием [4, 9]. Данный подход был реализован в работе [5] для исследования напряжений и деформаций, возникающих в рабочих частях ковочного молота при ударе о заготовку, где было получено хорошее экспериментальное подтверждение предварительных теоретических расчетов.

В данной работе делается попытка оценки деформаций, возникающих в заготовке при ударе о нее падающих частей ковочного молота.

Учет рассеяния энергии является важной частью данных исследований. Это достигается учетом демпфирования, путем замены всех жесткостных характеристик комплексными величинами, описывающими одновременно жесткость конструкции и явления затухания колебаний.

Для учета упругого рассеяния энергии согласно Сорокину С.Е. [6] для частотно-независимого трения все характеристики упругости системы заменять комплексными величинами, в данном случае:

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

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

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 [7].

Для вязко-упругого элемента Максвелла существуют следующие зависимости:

$$\frac{\partial}{\partial t} S_{ij} + \frac{S_{ij}}{t_M} = 2G_M \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t},$$

где t_M – время релаксации напряжений; S_{ij} – тензор напряжений; ϵ_{ij} – тензор деформаций.

Вводя параметр преобразования Лапласа $p = \frac{\partial}{\partial t}$ и учитывая, что при построении АФЧХ $p = i\omega$, получим:

$$\left(i\omega + \frac{1}{t_M} \right) S_{ij} = 2G_M \epsilon_{ij} i\omega;$$

$$S_{ij} = 2G_M \frac{i\omega \epsilon_{ij}}{\left(i\omega + \frac{1}{t_M} \right)} = 2G_M \frac{i\omega \epsilon_{ij} t_M}{(1 + t_M i\omega)}.$$

Откуда получаем выражения для характеристики E :

$$\bar{E} = E \frac{t_M i\omega}{1 + t_M i\omega}.$$

Коэффициент t_M определяется экспериментальным путем.

$$S_{1,2} U_1 - T_{1,2} U_2 = -T_{1,2} [u_2];$$

$$-T_{1,2} U_1 + (S_{1,2} + S_{2,3}) U_2 - T_{2,3} U_3 = -T_{1,2} [u_1] - T_{2,3} [u_3];$$

Из системы разрешающих уравнений находятся изображения перемещений в узлах системы. Для получения переходного процесса используется дискретное преобразование Фурье. Результат можно получить, осуществив численное интегрирование при $t = 0 \dots \infty$ по формуле

$$u(x, t) = \frac{1}{\pi_0} \int_0^\infty \text{Re}(U(\omega) \cdot e^{i\omega t}) d\omega,$$

где $u(x, t)$ – продольное перемещение поперечного сечения; x – координата сечения; t – время; ω – частота.

Предлагаемый подход справедлив для стержней неограниченной длины, поэтому разбиение на участки молота можно проводить в любых сечениях, но наиболее целесообразно там, где меняются физические или геометрические характеристики объекта.

Расчетная схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

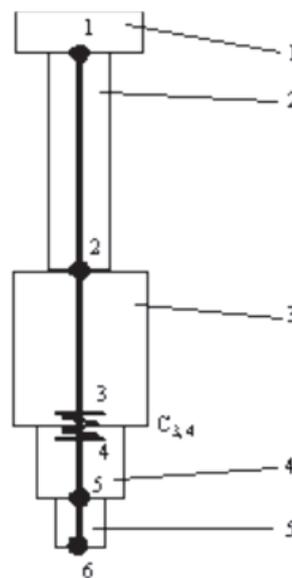


Рис. 1. Падающие части ковочного молота при ударе о заготовку:
1 – поршень, 2 – шток, 3 – баба,
4 – верхний боек, 5 – заготовка

Таким образом, расчетная схема ковочного молота, представленная на рис. 1, будет состоять из 6 узлов, на участках которых имеют место продольные колебания. Участок 3–4 моделирует стык. На завершающей стадии удара верхний боек считается присоединившимся к заготовке, что подтверждается экспериментально.

Расчетной схеме (рис. 1) соответствует следующая система разрешающих уравнений:

$$-T_{2,3}U_2 + (S_{1,2} + c_{3,4})U_3 - c_{3,4}U_4 = -T_{2,3} [u_2];$$

$$(S_{4,5} + c_{3,4})U_4 - c_{3,4}U_3 - T_{4,5}U_5 = -T_{4,5} [u_5];$$

$$\text{где } S_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot (1 + i\omega\gamma_{kn}) \cdot F_{nk}}{l_{nk}} - \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{3} \cdot \omega^2; \quad T_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot (1 + i\omega\gamma_{kn}) \cdot F_{nk}}{l_{nk}} + \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{6} \cdot \omega^2;$$

$$[u_n] = -\frac{\mu_{kn} V_0 l_{kn}^2}{E_{kn} F_{kn} (1 + i\omega\gamma_{kn})} \cdot \frac{1 - \cos \alpha_{kn}}{\alpha_{kn}^2}; \quad [u_k] = [u_n]; \quad \alpha_{kn} = \omega l_{kn} \sqrt{\frac{\mu_{kn}}{F_{kn} E_{kn} (1 + i\omega\gamma_{kn})}};$$

n, k – индексы, указывающие соответственно начало и конец участка; j – номер узла ($i = 1, 2, \dots, 19$); i – мнимая единица, $\sqrt{-1}$; E_{nk} – модуль упругости участка nk , Па; F_{nk} – площадь поперечного сечения участка nk , м²; l_{nk} – длина участка nk , м; μ_{nk} – масса единицы длины стержня участка nk , кг/м; V_0 – скорость соударения с заготовкой, м/с; γ_{nk} – коэффициент сопротивления участка nk ; ω – частота колебаний, с⁻¹.

Решение построенной системы уравнений осуществлялось при исходных данных, представленных в табл. 1, при $V = 7$ м/с. Параметры падающих частей соответствуют параметрам ковочного паровоздушного молота модели M1345. В работе [2] показано, что модуль упругости стали, нагретой до температуры 1200...1300°C, уменьшается в 25...30 раз по сравнению с холодной сталью, а меди – уменьшается в 6...7 раз при нагреве с 15 до 800°C, алюминия – в 30...35 раз при нагреве до 600°C.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Начало участка	Конец участка	E, Па	F, м ²		ρ , кг/м ³
1	2	1,6	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,024	7800
2	3	0,906	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,39	7800
3	4	Пружина с жесткостью $75 \cdot 10^6$ кг/м			
4	5	0,3	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,204	7800
5	6	0,115	$7 \cdot 10^9$	0,0016	7620

В результате численных расчетов, осуществленных с помощью программного комплекса MathCAD2001, получен переходный процесс в точке контакта верхнего бой-

ка молота с заготовкой, представленный на рис. 2. Получено, что осадка заготовки после первого удара составляет 21 мм. Что согласуется с экспериментальными данными.



Рис. 2. График перемещений 5 узла системы

Для проверки адекватности построенной математической модели в основном производстве ЗАО «Авиастар-СП» на операциях

свободнойковки были проведены испытания с целью исследования осадки заготовки в процессе ударного взаимодействия

с падающими частями ковочного молота при фиксированном ходе бабы. Испытания проводились в условиях выполнения производственной программы при ковке заготовок в количестве 5 шт. Для контроля размеров заготовки до и после удара падающих частей молота использовали кронциркуль.

Условия испытаний:

1. Молот ковочный паровоздушный арочного типа с массой падающих частей 3150 кг. Модель М1345. Заводской номер № 107.
2. Режим ковки – режим единичного удара.
3. Результаты опытно-промышленных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

	Материал заготовки	Температура ковки, °С	Форма и размеры заготовки	Ход бабы, мм	Размеры заготовки после 1 удара
1	30ХГСА	1170	∅ 45×115	635	∅ 50×93
2	30 ХГСА	1170	∅ 45×80	670	∅ 50×65
3	12Х18Н10Т	1170	∅ 210×92	448	∅ 220×83
4	АК6	450	110×140×86	610	95×96×145
5	АК6	465	∅ 110×240	510	∅ 50×93

По результатам экспериментальных исследований составлен и подписан акт опытно-промышленных испытаний с представителями ОАО «Авиастар-СП» и УЛГТУ.

Получили, что для заготовки, выполненной из стали 30ХГСА, при температуре ковки 1170°С, ∅45×115, осадка составляет 22 мм, что хорошо согласуется с теоретическим расчетом. Расхождение составляет 4,5%.

Вывод

- Построена математическая модель заготовки ковочного молота в виде тела Максвелла;
- выполнена проверка адекватности построенной математической модели путем сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными;
- получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Погрешность расчетов составила 5%.

Предлагаемый подход теоретического расчета осадки заготовки имеет ценность, заключающуюся в возможности предварительной оценки ее прочности в зависимости от разных технологических режимов ковки.

Из производственной практики известны нередкие случаи образования трещин на заготовках ковочных молотов, осколков, причиняющих вред жизни и здоровью рабочих и приводящие к материальным потерям на производстве.

Возможность теоретического расчета напряжений и деформаций, возникающих в деталях ковочного молота и заготовки, позволяет назначать оптимальные технологические режимы ковки.

Список литературы

1. Бойцов В.В. Горячая штамповка / В.В. Бойцов, И.Д. Трофимов. – М.: Высшая школа, 1978. – 304 с.
2. Драпкин Б.М. О температурной зависимости модуля упругости металлов / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, Б.Н. Леонов // Перспективные материалы. – М., 1998. – № 2.
3. Санкин Ю.Н. Динамические характеристики вязкоупругих систем с распределенными параметрами. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1977. – 312 с.
4. 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. – Том 65. Вып. 3. – С. 444–450.

5. Санкин Ю.Н. Нестационарные колебания стержневых систем при соударении с препятствием / Ю.Н. Санкин, Н.А. Юганова; под общ. Ред. Ю.Н. Санкина. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – 174 с.

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

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

8. Щеглов В.Ф. Совершенствование кузнечного оборудования ударного действия. – М.: Машиностроение, 1968. – 222 с.

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

References

1. Bojcov V.V. Gorjachaja shtampovka / V.V. Bojcov, I.D. Trofimov. M.: Vysshaja shkola, 1978. 304 p.

2. Drapkin B.M. O temperaturnoj zavisimosti modulja uprugosti metallov / B.M. Drapkin, V.K. Kononenko, B.N. Leonov // Zhurnal «Perspektivnye materialy», Moskva, 1998. no. 2.

3. Sankin Ju.N. Dinamicheskie harakteristiki vjazko-uprugih sistem s raspredelennymi parametrami / Ju.N. Sankin. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1977. 312 p.

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

5. Sankin Ju.N. Nestacionarnye kolebanija stержnevyyh sistem pri soudarenii s prepjatzstviem / Ju.N. Sankin, N.A. Juganova; pod obw. Red. Ju.N. Sankina. Ul'janovsk: UIGTU, 2010. 174 p.

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

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

8. Weglov V.F. Sovershenstvovanie kuznechnogo oborudovanija udarnogo dejstvija. M.: Mashinostroenie, 1968. 222 p.

9. Sankin Y.N. Longitudinal vibrations of elastic rods of step-variable cross-section colliding with rigid obstacle \ Yu.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 07.11.2012.