

УДК 539.31

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКЕ ПРИ КОВКЕ****Юганова Н.А.***Ульяновский государственный педагогический университет  
им. И.Н. Ульянова e-mail: yuganov\_vs@mail.ru*

В статье описан способ определения напряжений в заготовке при ковке на основе частотного метода расчета ковочного молота, представляющего собой модификацию метода конечных элементов, основанного на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента. Заготовка моделируется в виде вязкоупругого тела Максвелла, испытывающего ударные нагрузки. Построена математическая модель заготовки, частотным методом получена оценка осадки заготовки при ковке. Применение предлагаемого подхода позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния в любом интересующем сечении рабочих частей молота и заготовки, а также дает возможность проводить вариантыные расчеты с целью совершенствования технологииковки. Получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Полученные результаты имеют практическую значимость при аналитическом определении осадки заготовки, что позволит формализовать процессковки.

**Ключевые слова:** ковочный молот, частотный метод, напряжения, заготовка**METHOD FOR DETERMINING STRESS  
WITHIN THE WORKPIECE DURING FORGING****Yuganova N.A.***Ulyanovsk Stat Pedagogical Positive pedagogical University, Ulyanovsk, e-mail: yuganov\_vs@mail.ru*

The article describes a method for the determination of stresses in the workpiece during forging based on the frequency calculation method of forging hammer, which is a modification of the finite element method based on precise integration of the differential equations for finite element. The blank is modeled as a Maxwell viscoelastic body experiencing shock. A mathematical model of the workpiece, an estimate of the frequency method rainfall workpiece during forging. Application of the proposed approach allows the calculation of the stress-strain state in any section of interest to the working parts of the hammer and the workpiece, as well as gives you the opportunity to carry out alternative calculations to improve forging technology. A good agreement between theoretical and experimental results. The results are of practical importance in the analytical determination of rainfall harvesting, which will formalize the process of forging.

**Keywords:** forging hammer, the frequency method, stress, workpiece

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 частей ковочного молота без учета деформации заготовки совершенно недопустим [1].

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 систе-

мой с распределенными параметрами, соударяющейся с препятствием.

Заготовка, обладающая одновременно упругостью, вязкостью и пластичностью в различных формах и соотношениях, моделируется в виде вязко-упругого тела Максвелла. Учет рассеяния энергии осуществляется согласно [5].

Для вязко-упругого элемента Максвелла существуют следующие зависимости:

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

где  $t_M$  – время релаксации напряжений;  $S_{ij}$  – тензор напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – тензор деформаций.

Вводя параметр преобразования Лапласа  $p = \frac{\partial}{\partial t}$ , и учитывая, что при построении

АФЧХ  $p = i\omega$  получим:

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

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



$$\begin{aligned}
& -T_{5,6}W_5 + (S_{5,6} + S_{6,7})W_6 - T_{6,7}W_7 = -T_{5,6}[u_5] - T_{6,7}[u_7]; \\
& -T_{6,7}W_6 + S_{6,7}W_7 + c_{7,8}(W_7 - W_8) = -T_{6,7}[u_6]; \\
& S_{8,9}W_8 + c_{7,8}(W_8 - W_7) - T_{8,9}W_9 = -T_{8,9}[u_9]; \\
& -T_{8,9}W_9 + (S_{8,9} + S_{9,10})W_9 - T_{9,10}W_{10} = -T_{8,9}[u_8] - T_{9,10}[u_{10}]; \\
& -T_{9,10}W_9 + (S_{9,10} + S_{10,11})W_{10} - T_{10,11}W_{11} = 0; \\
& -T_{10,11}W_{10} + (S_{10,11} + S_{11,12})W_{11} - T_{11,12}W_{12} = 0; \\
& -T_{11,12}W_{11} + S_{11,12}W_{12} + c_{12,13}(W_{12} - W_{13}) = 0; \\
& S_{13,14}W_{12} + c_{12,13}(W_{13} - W_{12}) - T_{13,14}W_{14} = 0; \\
& -T_{13,14}W_{13} + S_{13,14}W_{14} + c_{14,15}(W_{14} - W_{15}) = 0; \\
& S_{15,16}W_{15} + c_{14,15}(W_{15} - W_{14}) - T_{15,16}W_{16} = 0; \\
& -T_{15,16}W_{15} + (S_{15,16} + S_{16,17})W_{16} - T_{16,17}W_{17} = 0; \\
& -T_{16,17}W_{16} + (S_{16,17} + G_{17,18} + G_{17,19} + c_{17})W_{17} - H_{17,18}W_{18} + D_{17,18}\phi_8 - \\
& \quad - H_{17,19}W_{19} + D_{17,19}\phi_9 = 0; \\
& -H_{17,18}W_{17} + (G_{17,18} + c_{18})W_{18} - K_{17,18}\phi_{18} = 0; \\
& \quad D_{17,18}W_{17} - K_{17,18}W_{18} + A_{17,18}\phi_{18} = 0; \\
& -H_{17,19}W_{17} + (G_{17,19} + c_{19})W_{19} + K_{17,19}\phi_{19} = 0; \\
& \quad -D_{17,19}W_{17} - K_{17,19}W_{19} + A_{17,19}\phi_{19} = 0,
\end{aligned}$$

где  $S_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot F_{nk}}{l_{nk}} - \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{3} \cdot \omega^2$ ;  $T_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot F_{nk}}{l_{nk}} + \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{6} \cdot \omega^2$ ;  $[u_k] = [u_n]$ ;  $A_{nk} = i_{nk} a_{nk}$ ;

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

$$K_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}} k_{nk}; \quad a_{nk} = (\sin\lambda_{nk} \cdot ch\lambda_{nk} - sh\lambda_{nk} \cdot \cos\lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk} \cdot t_{nk}; \quad \lambda_{nk} = l_{nk} \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu_{nk} \cdot \omega^2}{E_{nk} \cdot J_{nk}}};$$

$$\frac{1}{t_{nk}} = 1 - \cos\lambda_{nk} \cdot ch\lambda_{nk}; \quad k_{nk} = sh\lambda_{nk} \cdot \sin\lambda_{nk} \cdot \lambda_{nk}^2 \cdot t_{nk}; \quad d_{nk} = (ch\lambda_{nk} - \cos\lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk}^2 \cdot t_{nk};$$

$$D_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}} d_{nk}; \quad G_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2} g_{nk}; \quad h_{nk} = (\sin\lambda_{nk} + sh\lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk}^3 \cdot t_{nk};$$

$$g_{nk} = (\sin\lambda_{nk} \cdot ch\lambda_{nk} + sh\lambda_{nk} \cdot \cos\lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk}^3 \cdot t_{nk}; \quad H_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2} h_{nk};$$

$n, k$  – индексы, указывающие соответственно начало и конец участка;  $j$  – номер узла ( $i = 1, 2, \dots, 19$ );  $i$  – мнимая единица,  $\sqrt{i} = -1$ ;  $J_{nk}$  – осевой момент инерции сечения участка  $nk$ ,  $m^4$ ;  $E_{nk}$  – модуль упругости участка  $nk$ , Па;  $F_{nk}$  – площадь поперечного сечения участка  $nk$ ,  $m^2$ ;  $l_{nk}$  – длина участка  $nk$ , м;  $\mu_{nk}$  – масса единицы длины стержня участка  $nk$ , кг/м;  $V_0$  – скорость соударения с заготовкой, м/с;  $\gamma_{nk}$  – коэффициент сопротивления участка  $nk$ ;  $\omega$  – частота колебаний,  $s^{-1}$ ;  $W_j$  – пере-

мещение  $j$ -го узла, м;  $\phi_j$  – угол поворота  $j$ -го узла, рад;  $c_j$  – жесткости пружин, моделирующих упругое основание в  $j$ -м узле, кг/м;  $c_{nk}$  – жесткости пружин, моделирующих стыки  $nk$ , кг/м.

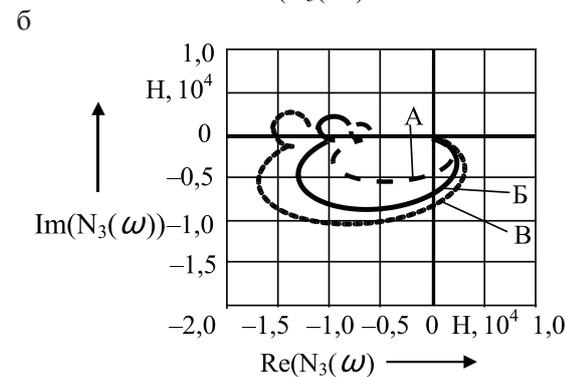
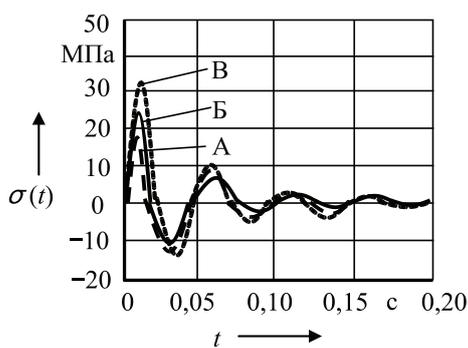
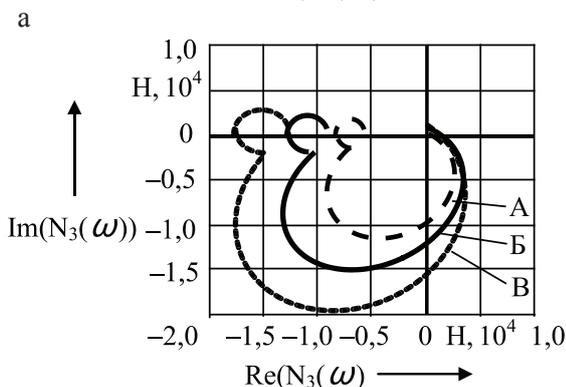
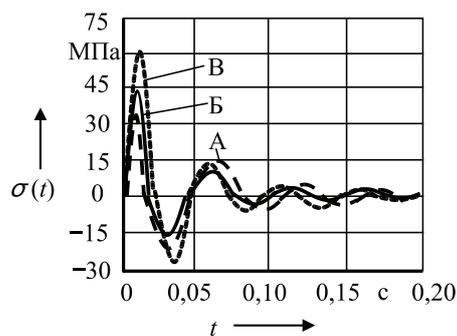
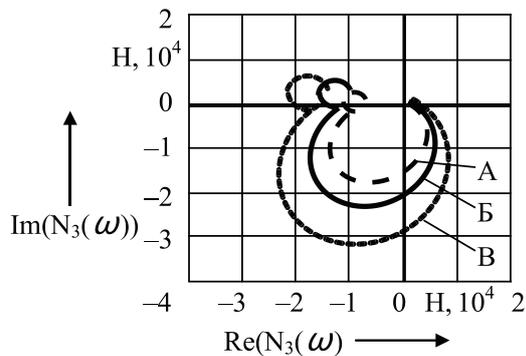
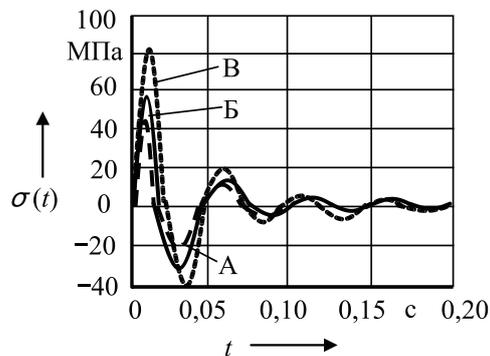
Из этой системы находятся изображения перемещений в узлах системы. Зная перемещения начала и конца стержня, рассчитываются продольные усилия  $N_j(\omega)$  (рис. 2). Переходя к оригиналам  $N(t)$ , находятся напряжения  $\sigma(t)$  и деформации  $\varepsilon(t)$ ,

которые связаны с усилиями следующими зависимостями:

$$\sigma(t) = \frac{N(t)}{F}; \quad \varepsilon(t) = \frac{N(t)}{EF},$$

где  $\sigma(t)$  – напряжение, Па;  $N(t)$  – продольная сила, Н;  $t$  – время, с;  $\varepsilon(t)$  – деформации, м;  $F$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости, Па.

В ходе исследований выявлен информативный диапазон частот, позволяющих идентифицировать получаемые АФЧХ. Для этого провели анализ спектра колебаний падающих частей молота при жестком ударе и при ударе о заготовки различных размеров и материалов с разными скоростями соударения в диапазоне частот от 0 до 500 с<sup>-1</sup> в различных узлах стержневой системы.



В

Рис. 2

Все дальнейшие вычисления проводятся в выявленном информативном диапазоне частот. При этом материал поковки существенно не влияет на указанный диапазон частот, вызывая лишь некоторое увеличение резонансной частоты по мере уменьшения модуля упругости  $E$  и коэффициента сопротивления материала поковки  $\gamma$ . Так, при жестком ударе значение резонансной

частоты в месте заделки штока в бабу составило 160 с<sup>-1</sup>, для поковки из стали 45 ( $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 0,01$ ) – 204 с<sup>-1</sup>, для титанового сплава ОТ4 ( $E = 1,03 \cdot 10^{11}$  Па,  $\rho = 7000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 0,01$ ) – 223 с<sup>-1</sup>, а для алюминиевого сплава АК6 ( $E = 1,05 \cdot 10^{11}$  Па,  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 0,007$ ), обладающего меньшим пределом прочности – 250 с<sup>-1</sup>.

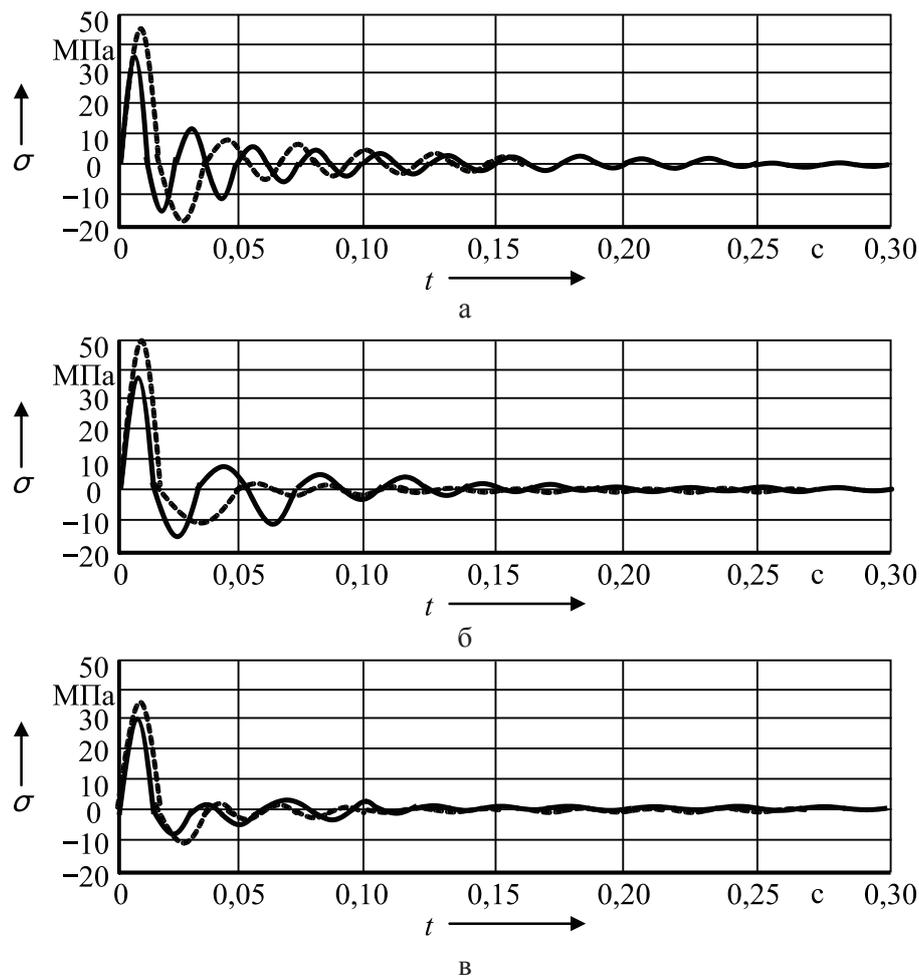


Рис. 3

К изменяемым параметрам при работе молота относятся скорость соударения, материал и размеры поковки. Теоретические исследования следующего этапа показали, что на напряжения, возникающие в различных узлах системы при соударении падающих частей с заготовкой, влияют все вышеперечисленные параметры (рис. 2).

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных результатов показали, что средняя погрешность вычислений составляет 14% (рис. 3), что свидетельствует об адекватности построенных математических моделей и достаточной точности предлагаемого способа определения напряжений в заготовке при ковке.

#### Список литературы

1. Зайденберг Г.Я. Вопросы динамики скоростных штамповочных молотов: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук. – М., 1970, –31 с.
2. Левина З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 267 с.
3. Санкин Ю.Н. Динамические характеристики вязкоупругих систем с распределенными параметрами. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1977. –312 с.
4. Санкин Ю.Н. Продольные колебания упругих стержней ступенчато-переменного сечения при соударении

с жестким препятствием / Ю.Н. Санкин, Н.А. Юганова // Прикладная математика и механика. – М.: Изд-во «Наука», 2001. – Т. 65. Вып. 3. – С. 444–450.

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

#### References

1. Zajdenberg, G.YA. Voprosy dinamiki skorostnykh shtampovochnykh molotov: avtoreferat dis. ... d-ra. tekhn. nauk / G.YA. Zajdenberg. M., 1970, 31 p.
2. Levina, Z.M. Kontaktnaya zhestkost' mashin / Z.M. Levina, D.N. Reshetov. – M.: Mashinostroenie, 1971. 267 p.
3. Sankin, YU. N. Dinamicheskie kharakteristiki vyazko-uprugikh sistem s raspredelennymi parametrami / YU.N. Sankin. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1977. 312 p.
4. Sankin, YU.N. Prodol'nye kolebaniya uprugikh stержnej stupenchato-peremennogo secheniya pri soudarenii s zhyostkim prepyatstviem / YU.N. Sankin, N.A. YUganova // Prikladnaya matematika i mekhanika. M.: Izd-vo «Наука», 2001. Tom 65. Vyp. 3. pp. 444–450.
5. Sorokin, E.S. K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem / E.S. Sorokin. M.: Gostrojizdat, 1960. 131 p.

#### Рецензенты:

Лебедев А.М., д.т.н., доцент, профессор Ульяновского высшего авиационного училища (института), г. Ульяновск;  
 Антоненц И.В., д.т.н., профессор Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск.

Работа поступила в редакцию 17.01.2014.