

ШТОК КОВОЧНОГО МОЛОТА С ОТВЕРСТИЯМИ СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Санкин Ю.Н.¹, Юганова Н.А.²

¹ Ульяновский государственный технический университет (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), yns@ulstu.ru

² Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова (Россия, 432700, г. Ульяновск, пл. 100-летия В.И. Ленина, д. 4), yuganov_vs@mail.ru

Предложена новая конструкция штока ковочного молота с отверстиями ступенчато-переменного сечения, позволяющая снизить нагрузки, возникающие в месте заделки штока в бабу. Снижение напряжений достигается за счет перераспределения напряжений при ударном воздействии в различных сечениях штока. Эффект получен в результате частотного метода расчета ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой, который представляет собой модификацию метода конечных элементов, основанную на точном интегрировании дифференциального уравнения для конечного элемента. 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.

Ключевые слова: ковочный молот, частотный метод, расчет ковочных молотов, шток.

ROD OF THE FORGING HAMMER WITH OPENINGS OF STEP AND VARIABLE SECTION

Sankin Y.N.¹, Yuganova N.A.²

¹ Ulyanovsk State Technical University (32, Severny Venetz str., 432027 Ulyanovsk, Russia), Department of Theoretical and Applied Mechanics, professor, PD, yns@ulstu.ru

² Ulyanovsk Stat Pedagogical University (4, square of the 100-anniversary of V.I. Lenin, 432700 Ulyanovsk, Russia), Department of technical disciplines, candidate of technical sciences, head of the department, yuganov_vs@mail.ru

The new construction of a rod of a forging hammer with openings of the step and variable section, allowing to lower the loadings arising in a place of seal of a rod in the ram is offered. Decrease in tension is reached at the expense of redistribution of tension at shock influence in various sections of a rod. Effect was obtained by the method of calculation of the frequency of forging hammer in the process of shock interaction with the workpiece, which is a modification of the finite element method, based on the precise integration of the differential equations for finite element. The proposed changes in the design of the stem, decreased in sealing stem woman voltage (18 - 20%) and are aimed at improving the reliability of stocks, thus increasing their life, and thus reduce the material loss from the replacement of stocks and downtime in during replacement.

Keywords: forging hammer, frequency method, calculation of forg hammers, rod.

Прочность деталей молота, качественные показатели этой машины зависят от силы сопротивления поковки деформированию. У каждого молота существует предельная поковка, при которой долговечность слабейшего звена (штока) оказывается неудовлетворительной. Шток постоянного сечения весьма далек от равнопрочного состояния, поскольку работает в условиях больших ударных нагрузок, испытывая при ударе напряжение от продольных сил. В месте заделки штока в бабу одновременно действуют два неблагоприятных фактора: возникает максимальное динамическое напряжение и имеет место наибольшая концентрация напряжений. В итоге подавляющее число поломок таких штоков происходит в одном и том же сечении – в заделке [4].

В настоящее время в машиностроении используются штоки ковочных молотов, имеющие сплошное поперечное сечение согласно ГОСТ 9752-75 (рис. 1).

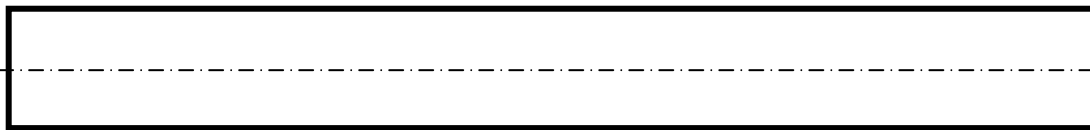


Рис. 1.

Недостатком этой конструкции является недостаточная надежность и долговечность штока в месте его заделки в бабу. В данной работе предлагается новая конструкция штока с полостями переменного сечения, например цилиндрическими отверстиями ступенчато-переменного сечения, начинающимися от концевой участка штока со стороны, противоположной месту заделки штока в бабу (рис. 2).

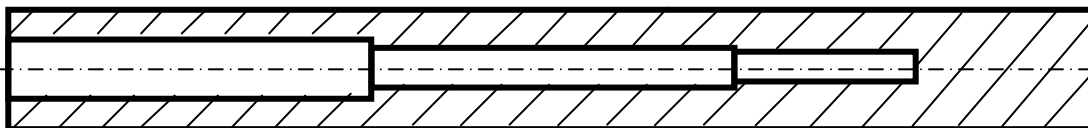


Рис. 2.

Предлагаемая конструкция штока позволяет снизить нагрузки, возникающие в месте заделки штока в бабу, и направлена 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. Снижение напряжений достигается за счет перераспределения напряжений при ударном воздействии в различных сечениях штока. Этот эффект получен в результате частотного метода расчета ковочного молота в процессе ударного взаимодействия с заготовкой.

Рассмотрим для примера паровоздушный ковочный молот арочного типа модели М1345 (рис. 3).

На рис. 3. представлена принципиальная расчетная схема молота, позволяющая проводить варианты расчеты в случае существующей и предлагаемой конструкции штока, где участки 7-8, 12-13, 14-15 моделируют стыки, узлы 17, 18, 19 моделируют упругое основание.

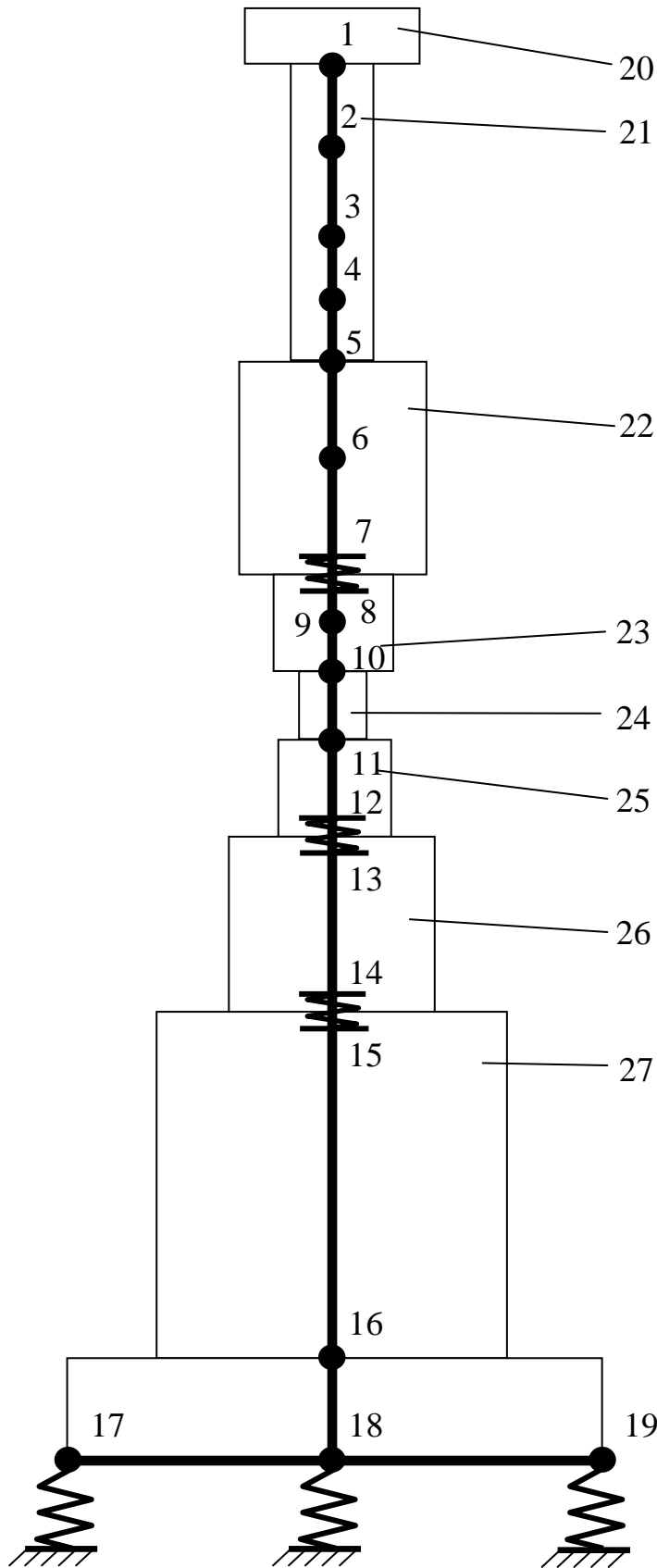


Рис. 3.

Рассмотрим 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; 5].

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. При составлении расчетной схемы молота считалось, что в штоке, бабе, бойках, подушке и верхней части шабота возникают продольные колебания, а в основании шабота – поперечные.

Предлагаемой расчетной схеме (рис. 3) соответствует следующая система разрешающих уравнений для построения амплитудно-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) перемещений:

$$\begin{aligned}
 (S_{1,2} - m\omega^2)W_1 - T_{1,2}W_2 &= -T_{1,2}[u_2]; \\
 -T_{1,2}W_1 + (S_{1,2} + S_{2,3})W_2 - T_{2,3}W_3 &= -T_{1,2}[u_1] - T_{2,3}[u_3]; \\
 -T_{2,3}W_2 + (S_{2,3} + S_{3,4})W_3 - T_{3,4}W_4 &= -T_{2,3}[u_2] - T_{3,4}[u_4]; \\
 -T_{3,4}W_3 + (S_{3,4} + S_{4,5})W_4 - T_{4,5}W_5 &= -T_{3,4}[u_3] - T_{4,5}[u_5]; \\
 -T_{4,5}W_4 + (S_{4,5} + S_{5,6})W_5 - T_{5,6}W_6 &= -T_{4,5}[u_4] - T_{5,6}[u_6]; \\
 -T_{5,6}W_5 + (S_{5,6} + S_{6,7})W_6 - T_{6,7}W_7 &= -T_{5,6}[u_5] - T_{6,7}[u_7]; \\
 -T_{6,7}W_6 + S_{6,7}W_7 + c_{7,8}(W_7 - W_8) &= -T_{6,7}[u_6]; \\
 S_{8,9}W_8 + c_{7,8}(W_8 - W_7) - T_{8,9}W_9 &= -T_{8,9}[u_9]; \\
 -T_{8,9}W_9 + (S_{8,9} + S_{9,10})W_9 - T_{9,10}W_{10} &= -T_{8,9}[u_8] - T_{9,10}[u_{10}]; \\
 -T_{9,10}W_9 + (S_{9,10} + S_{10,11})W_{10} - T_{10,11}W_{11} &= 0; \\
 -T_{10,11}W_{10} + (S_{10,11} + S_{11,12})W_{11} - T_{11,12}W_{12} &= 0; \\
 -T_{11,12}W_{11} + S_{11,12}W_{12} + c_{12,13}(W_{12} - W_{13}) &= 0; \\
 S_{13,14}W_{12} + c_{12,13}(W_{13} - W_{12}) - T_{13,14}W_{14} &= 0; \\
 -T_{13,14}W_{13} + S_{13,14}W_{14} + c_{14,15}(W_{14} - W_{15}) &= 0; \\
 S_{15,16}W_{15} + c_{14,15}(W_{15} - W_{14}) - T_{15,16}W_{16} &= 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -T_{15,16}W_{15} + (S_{15,16} + S_{16,17})W_{16} - T_{16,17}W_{17} = 0; \\
& -T_{16,17}W_{16} + (S_{16,17} + G_{17,18} + G_{17,19} + c_{17})W_{17} - H_{17,18}W_{18} + D_{17,18}\varphi_8 - \\
& \quad - H_{17,19}W_{19} + D_{17,19}\varphi_9 = 0; \\
& -H_{17,18}W_{17} + (G_{17,18} + c_{18})W_{18} - K_{17,18}\varphi_{18} = 0; \\
& D_{17,18}W_{17} - K_{17,18}W_{18} + A_{17,18}\varphi_{18} = 0; \\
& -H_{17,19}W_{17} + (G_{17,19} + c_{19})W_{19} + K_{17,19}\varphi_{19} = 0; \\
& -D_{17,19}W_{17} - K_{17,19}W_{19} + A_{17,19}\varphi_{19} = 0,
\end{aligned}$$

где:

$$S_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot F_{nk}}{l_{nk}} - \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{3} \cdot \omega^2, \quad T_{nk} = \frac{E_{nk} \cdot F_{nk}}{l_{nk}} + \frac{\mu_{nk} \cdot l_{nk}}{6} \cdot \omega^2;$$

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

$$\alpha_{kn} = \omega l_{kn} \sqrt{\frac{\mu_{kn}}{F_{kn} E_{kn} (1 + i\omega\gamma_{kn})}}; \quad A_{nk} = i_{nk} a_{nk}; \quad i_{nk} = \frac{E_{nk} J_{nk}}{l_{nk}};$$

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

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

$$D_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}} d_{nk}; \quad G_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2} g_{nk}; \quad H_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}^2} h_{nk}; \quad K_{nk} = \frac{i_{nk}}{l_{nk}} k_{nk};$$

$$d_{nk} = (ch \lambda_{nk} - \cos \lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk}^2 \cdot t_{nk}; \quad h_{nk} = (\sin \lambda_{nk} + sh \lambda_{nk}) \cdot \lambda_{nk}^3 \cdot t_{nk};$$

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

n, k – индексы, указывающие соответственно на 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 , м⁴;

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 , $\frac{кг}{м}$;

V_0 – скорость соударения с заготовкой, м/с;

γ_{nk} – коэффициент сопротивления участка nk .

ω – частота колебаний, $с^{-1}$;

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, $\frac{кг}{м}$;

c_{nk} – жесткости пружин, моделирующих стыки nk , $\frac{кг}{м}$.

Из этой системы находятся изображения перемещений в узлах системы. Зная перемещения начала и конца стержня, рассчитываются продольные усилия $N_i(\omega)$. 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, $м^2$;

E – модуль упругости, Па.

Установлено, что максимальные напряжения, в несколько раз превышающие напряжения в других узлах системы, возникают в месте заделки штока в бабу (5 узел рис. 3), 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. 2).

При динамическом анализе конструкции с таким штоком получили снижение напряжений в 3 узле на 15% в случае стальной заготовки и на 16% – в случае алюминиевой.

Это достигается за счет перераспределения напряжений во 2, 3, 4 и 5 узлах. Так, при

использовании предлагаемой конструкции штока напряжение в проблемном 5 сечении уменьшается с 31,2 до 27,5 МПа в случае стальной заготовки и с 20,3 до 17 МПа в случае алюминиевой. А во втором и третьем узлах напряжение увеличивается приблизительно в три и два раза соответственно, что незначительно по сравнению с напряжением в 5 узле. При этом наблюдается снижение напряжений на 5–6% в остальных узлах системы (рис. 4).

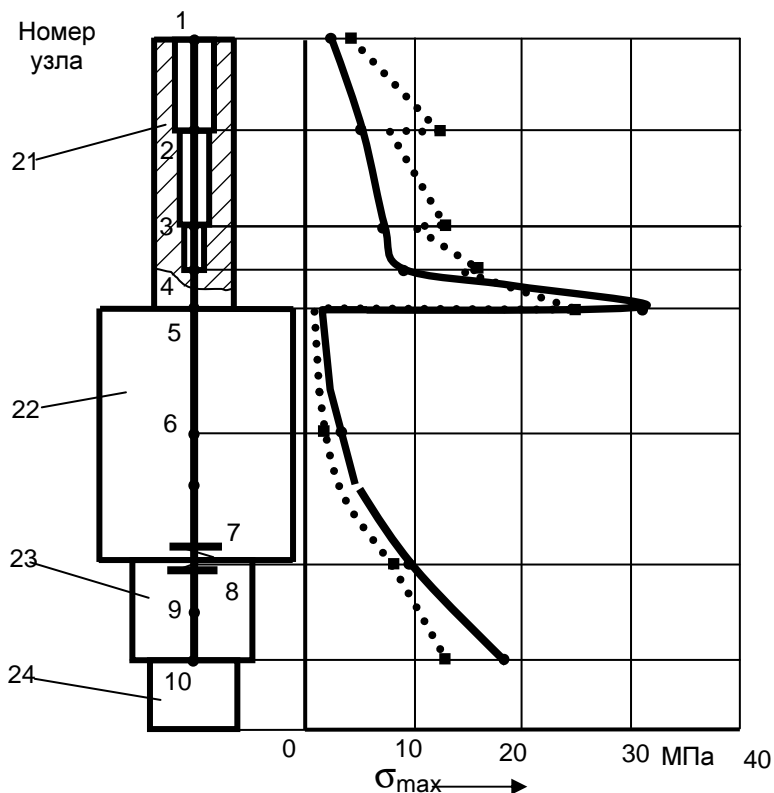


Рис. 4.

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.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных результатов в случае молота со штоком постоянного сечения показали, что средняя погрешность вычислений составляет 14% для частот собственных колебаний и 25% для амплитуд колебаний [1].

Список литературы

1. Санкин Ю.Н. Динамическая модель заготовки при проектировании ковочных молотов / Ю.Н. Санкин, Н.А. Юганова // Прикладная математика и механика : сб. научных трудов. – Ульяновск, УлГТУ, 2011. – С. 458–464.

2. Санкин Ю.Н. Динамические характеристики вязко-упругих систем с распределенными параметрами. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1977. – 312 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. : Наука, 2001. – Т. 65. – Вып. 3. – С. 444-450.
4. Щеглов В.Ф. Совершенствование кузнечного оборудования ударного действия. – М. : Машиностроение, 1968. – 222 с.
5. 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. – 2001. – Vol. 65. – No 3. – P. 427–433.

Рецензенты

Лебедев А.М., доктор технических наук, доцент, профессор Ульяновского высшего авиационного училища (института), г. Ульяновск.

Дмитриенко Г.В., доктор технических наук, профессор Ульяновского высшего авиационного училища (института), г. Ульяновск.