

УДК 621.735.06; 621.97

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В КРИВОШИПНОМ ГОРЯЧЕШТАМПОВОЧНОМ ПРЕССЕ****Телегин И.В.***ФБГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, e-mail: igor.v.telegin@gmail.com*

Статья посвящена вопросам анализа динамики кривошипного горячештамповочного пресса, целью которого является расчёт параметров колебательных процессов, возникающих при деформации его элементов. Метод, лежащий в основе теоретических разработок, – моделирование реального механизма системой сосредоточенных масс, соединённых нелинейными, в силу наличия зазоров в кинематических парах, упруго-диссипативными связями. Уровень динамических процессов в деталях и узлах пресса оценивается на основании как изменяемых во времени значений их кинематических характеристик и нагрузок, так и ряда критериев, в числе которых точность позиционирования, средние и максимальные нагрузки, коэффициенты динамичности. Результатом выполненных исследований является программный продукт, включающий помимо блока численного интегрирования уравнений движения масс модели, интерактивный интерфейс ввода конструктивных параметров пресса и данных о технологических нагрузках и блок графического представления и сохранения полученной информации.

Ключевые слова: кривошипный горячештамповочный пресс, динамическая модель, привод пресса, кривошипно-ползунный механизм, станина, зазоры в кинематических парах, динамические нагрузки

COMPUTER SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN HOT-CRANK PRESS**Telegin I.V.***Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: igor.v.telegin@gmail.com*

The article is devoted to the analysis of dynamic processes of the hot-crank press, the purpose of which is to calculate the parameters of oscillatory processes occurring during deformation of its elements. It is based on the method of modeling a real mechanism as a system of concentrated masses connected by non-linear, due to the presence of gaps in the kinematic pairs of elastic-dissipative coupling. The level of dynamic processes of press's parts and nodes is estimated on the basis of a time-varying values of the kinematic characteristics and loads, as well as a number of criteria, including the positioning accuracy, average and maximum loads, dynamic factor. The result is a software product, including besides the numerical integration of the equations of block mass motion model, interactive input interface design parameters press and loads data processing unit and graphic presentation and preservation of the obtained information.

Keywords: hot-crank press, dynamic model, crank drive, slider-crank mechanism, press frame, gaps in the kinematic pairs, dynamic load

Современный кривошипный горячештамповочный пресс (рис. 1) – изделие, подвижные детали и узлы которого массой от сотен килограмм до нескольких тонн в процессе работы циклически перемещаются со скоростями, соответствующими десяткам оборотов главного вала в минуту, при технологических нагрузках на исполнительном звене (ползуне) достигающих десятков меганьютонов. Оценка способности пресса к выполнению конкретного технологического процесса горячей объёмной штамповки (ГОШ) осуществляется, как правило, на основании графика допустимых усилий на его ползуне [1] без учёта возникающих при этом динамических нагрузок, в то время как их влияние на работоспособность и долговечность узлов пресса не вызывает сомнений и подтверждена рядом исследований [2–4].

В известных работах, посвящённых анализу динамических процессов в КГШП, его механизмы моделируются многомассовыми колебательными системами, позволяющими рассчитать нагрузки, связанные с крутильными колебаниями валов и растя-

жением-сжатием шатуна, ползуна и станины пресса [2–4]. Однако при штамповке на КГШП максимальные нагрузки возникают в конце рабочего хода ползуна, когда вращающая составляющая усилия со стороны ползуна на главный вал пресса минимальна. На этом временном отрезке элементы пресса: станина, шатун и ползун испытывают преимущественно деформации растяжения-сжатия, а главный вал работает на изгиб. В течение остального времени схема нагружения главного вала – кручение и изгиб. Очевидно, что при моделировании динамических процессов, протекающих в КГШП, необходимо учитывать эти особенности.

Динамическая модель [4], представляющая собой систему сосредоточенных масс, соединённых упруго-диссипативными связями, приведена на рис. 2. Основное отличие данной модели от уже известных [2–4] – возможность исследования колебательных процессов в КГШП как с учётом крутильных деформаций валов, растяжения-сжатия шатуна, ползуна, станины пресса, так и изгибных колебаний его главного вала.

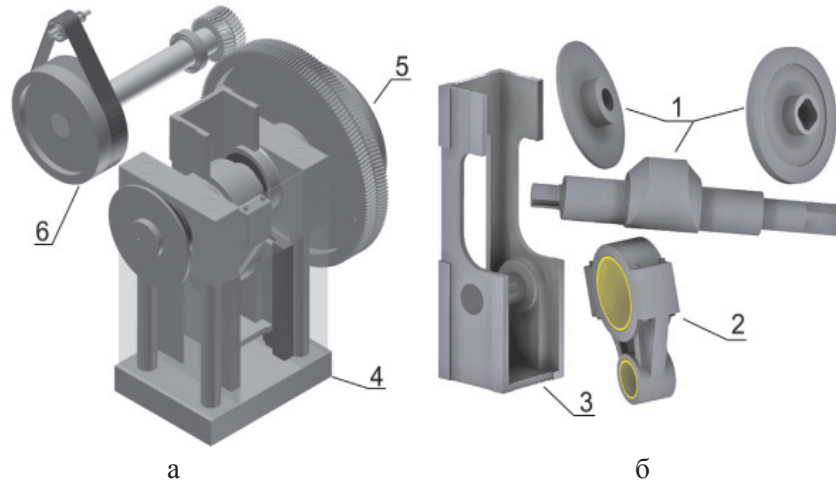


Рис. 1. Твердотельная модель КГШП модели К8544:
 а – в сборе, б – главный вал и детали кривошипно-ползунного механизма;
 1 – главный (эксцентриковый) вал и диски тормоза и муфты; 2 – шатун; 3 – ползун; 4 – станина;
 5 – муфта; 6 – привод

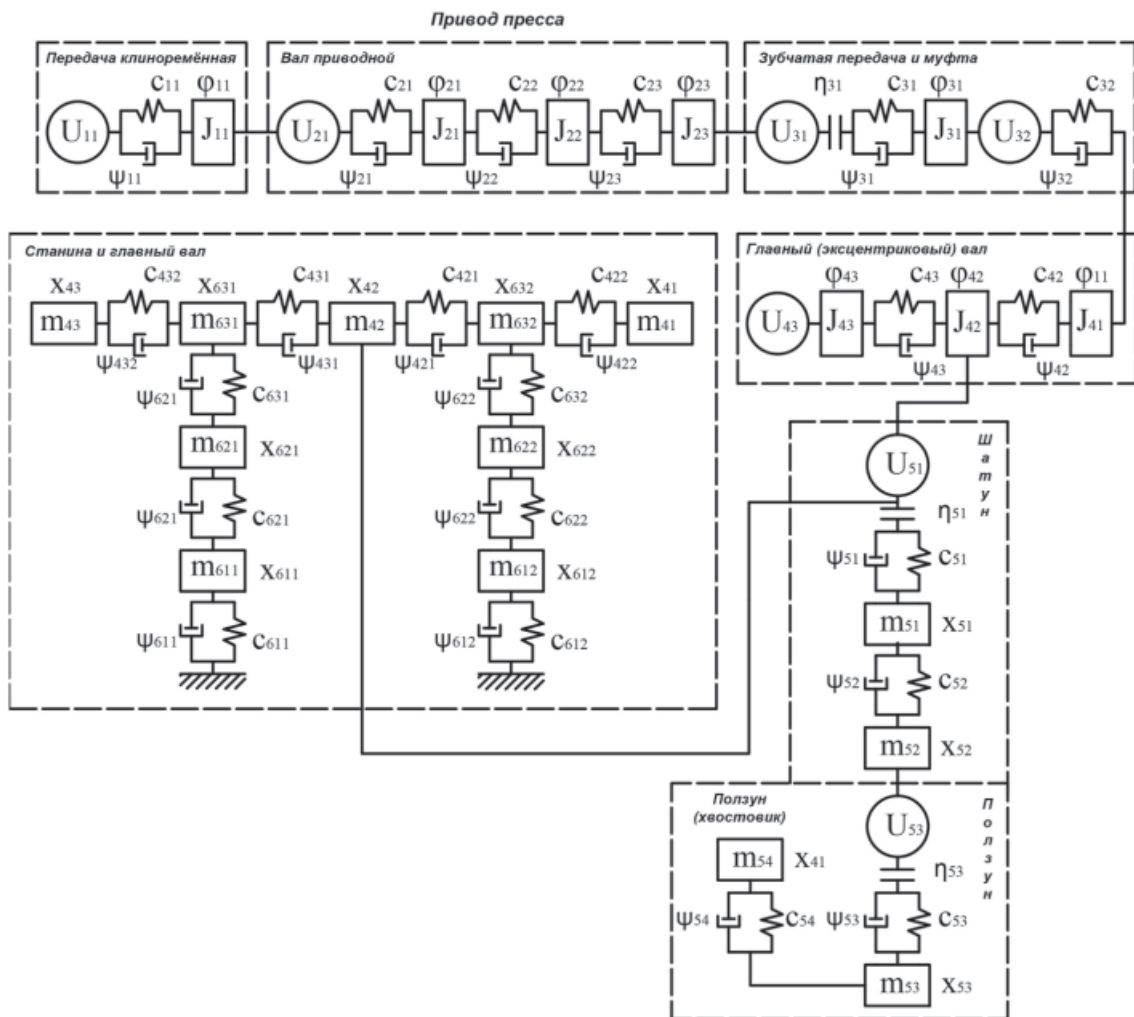


Рис. 2. Динамическая модель КГШП:
 J_{mn} , m_{mn} – моменты инерции и массы, c_{mn} , ψ_{mn} – жёсткости и коэффициенты диссипации,
 η_{mn} – зазоры в кинематических парах, U_{mn} – функции положения, φ_{mn} , x_{mn} – перемещения,
 где $m = 1...6$ – номер механизма, n – номер массы механизма

Структура и основные характеристики динамической модели следующие:

1. Электродвигатель – маховик, связанные клиноремённой передачей. Одномассовая динамическая модель ($m = 1, n = 1$). Функция положения $U_{11} = \omega \cdot t$, где $\omega = \text{const}$ – угловая скорость электродвигателя.

2. Вал приводной – трёхмассовая динамическая модель ($m = 2, n = 3$).

3. Муфта (зубчатое колесо, постоянно вращающиеся детали фрикционной муфты,

диск муфты) – двухмассовая динамическая модель ($m = 3, n = 2$). В зубчатом зацеплении, передаточное отношение которого определяется функцией $= \varphi_{23}$, предполагается наличие зазора. Функция положения $U_{32} = \varphi_{31}$ при работе пресса в автоматическом режиме (муфта включена). При работе пресса в режиме одиночных ходов на участке включения муфты предполагается, что ускорение дисков муфты изменяется по синусоидальному закону (1):

$$U_{32} = \frac{\pi \cdot (\varphi_{31} + \varphi_{\text{вм}}) - \varphi_p \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_p} (\varphi_{31} - \varphi_{\text{вм}})\right)}{2\pi}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{вм}}, \varphi_p$ – углы включения и разгона муфты.

На участке торможения имеет место разрыв связи с приводом ($c_{32} = 0, \psi_{32} = 0$).

4. Главный (эксцентриковый) вал – трёхмассовая динамическая модель ($m = 4, n = 3$). Расчёт крутильных колебаний. Первая масса – участок вала с диском муфты до эксцентрика. Вторая масса – эксцентрик.

Третья масса – фрагмент главного вала после эксцентрика и диск тормоза. При работе пресса в автоматическом режиме воздействие тормоза на массу J_{43} отсутствует ($U_{43} = \varphi_{43}$). При работе пресса в режиме одиночных ходов на участке включения тормоза предполагается изменение ускорения его диска по синусоидальному закону (2):

$$U_{43} = \frac{\pi \cdot (\varphi_{43} + \varphi_{\text{вт}}) - \varphi_t \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_t} (\varphi_{43} - \varphi_{\text{вт}} + \varphi_t)\right)}{2\pi}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{вт}}, \varphi_t$ – углы включения тормоза и торможения.

Расчёт изгибных колебаний главного вала выполняется одновременно с расчётом колебательных процессов в станине.

5. Кривошипно-ползунный механизм – четырёхмассовая динамическая модель ($m = 5, n = 4$). Шатун – двухмассовая динамическая модель. Предполагается, что шатун работает только на растяжение-сжатие. Жёсткости шатуна на растяжение и сжатие различны. Ползун – двухмассовая динамическая модель. Первая масса – сам ползун, вторая – его хвостовик. В соединениях эксцентрик главного вала – шатун и шатун – ползун имеются зазоры. Функция, связывающая положение ползуна и шатуна с углом поворота главного вала $U_{51}(\varphi_{42})$, приведена в работах [1, 4], $U_{53} = x_{52}$.

6. Станина и главный вал – девятимассовая динамическая модель. Массы $m_{6ni} - n = 3, i = 1$ – левая стойка станины, $i = 2$ – правая стойка станины. Деформация растяжение-сжатие. Массы m_{42} (эксцентрик), m_{41} (муфта), m_{43} (тормоз) – главный вал. Деформация растяжение-сжатие и изгиб. Изгиб фрагментов главного вала рассчитывается как линейное отклонение его положения под воздействием сосредоточенной силы.

Движение масс динамической модели (рис. 2), описывается двадцатью двумя обыкновенными, нелинейными, кусочно-непрерывными дифференциальными уравнениями второго порядка (математическая модель), составленными с помощью уравнения Лагранжа 2-го рода с «лишними» координатами [4].

Расчёт упруго-инерционных и диссипативных параметров ($c_{mn}, m_{mn}, J_{mn}, \psi_{mk}$) осуществляется на основе твердотельной модели пресса (рис. 1) в соответствии с методикой, предложенной в работах [4, 5].

На рис. 3 представлено основное окно программного решения «Динамика кривошипного пресса» [6], в рамках которого предусмотрена возможность ввода, тестирования и сохранения параметров динамической модели кривошипного пресса и реализуемой с его помощью технологии. Компьютерное моделирование динамики пресса на основе данной программы позволяет решить следующие задачи:

- исследовать влияние конструктивных параметров пресса на уровень протекающих в его элементах динамических процессов, что представляет несомненный интерес при выполнении работ, связанных с проектированием нового и совершенствованием существующего оборудования;

● определить пригодность прессы для выполнения технологического процесса в зависимости от степени износа его кинематических пар;

● выполнить сравнительный анализ возможных технологий изготовления одной и той же поковки с точки зрения их влияния на динамику прессы.

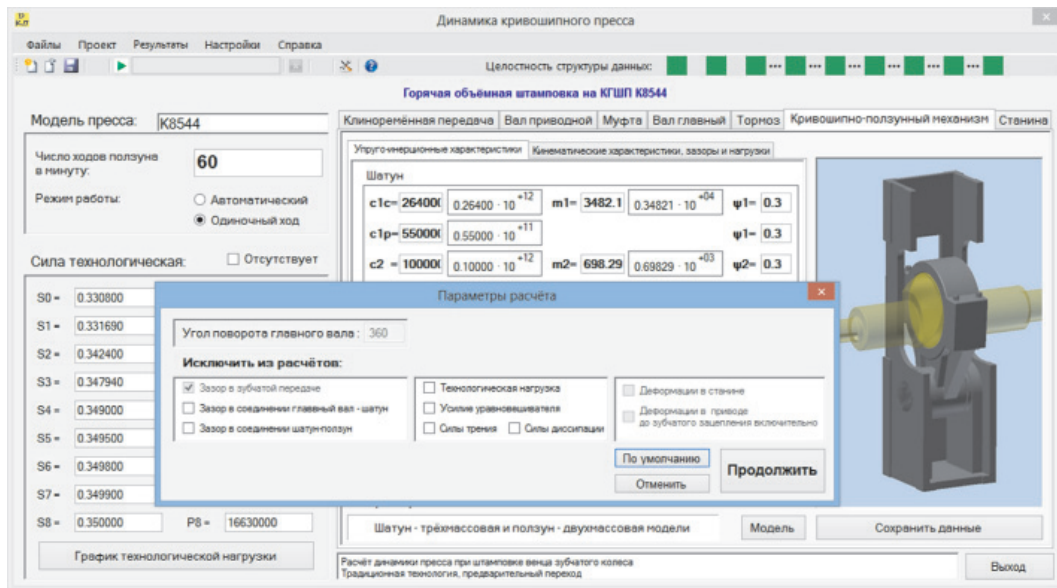


Рис. 3. Определение параметров КГШП и параметров расчёта

На рис. 4 приведено окно результатов компьютерного моделирования динамики прессы К8544 при выполнении им технологи-

ческой операции предварительной штамповки поковки каретки синхронизатора коробки передач грузового автомобиля КАМАЗ [7].

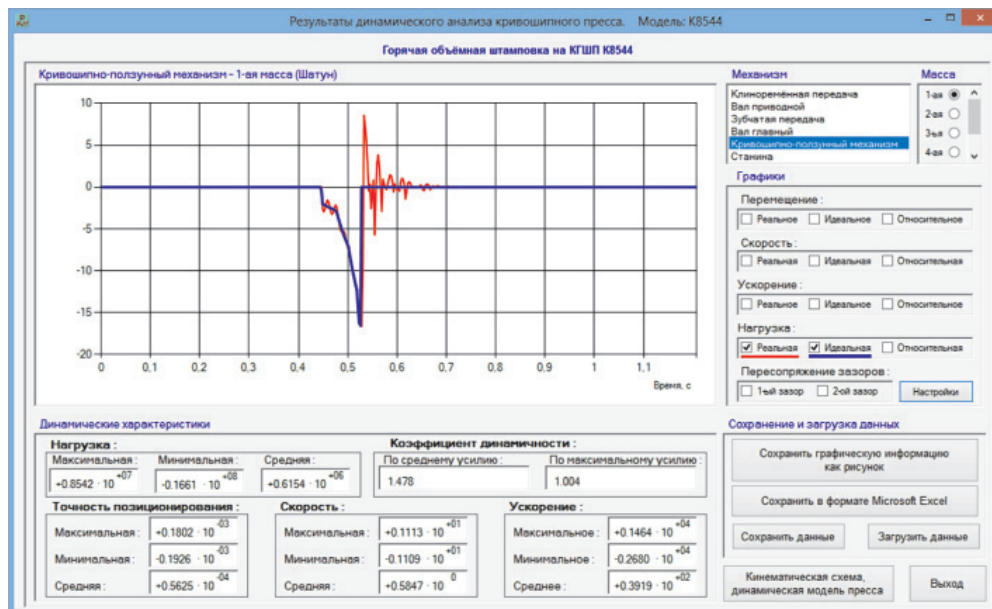


Рис. 4. Результаты динамического анализа КГШП

Уровень динамических процессов в механизме можно оценить:

● путём визуального анализа графиков изменения перемещений, скоростей, ускорений его элементов, связанных с соответствующими массами динамической модели, нагрузками, возникающими при деформа-

ции этих элементов, диаграммам пересопряжения зазоров в кинематических парах;

● на основе значений ряда критериев, отражающих общий уровень динамических процессов в исследуемом механизме.

Кроме графическое представление изменения кинематических параметров движения

масс модели и нагрузок на них воздействующих, так и рассчитать значения ряда критериев, характеризующих интенсивность динамических процессов в механизмах пресса, основными из которых являются максимальная (P_{\max}), минимальная (P_{\min}) и средняя (P_{cp}) нагрузки, коэффициенты динамичности. Учитывая, что элементы пресса в процессе работы испытывают нагрузки различного направления, в дальнейшем будем считать, что деформация и соответствующая ей сила отрицательны, если они возникают в результате приложения к ползуну пресса нагрузки однонаправленной с технологической. Средняя нагрузка рассчитывается в соответствии с выражением (3):

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} |P(t)| \cdot dt, \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – начальный и конечный моменты отрезка времени, на котором исследуется динамика пресса; $P(t)$ – текущее значение нагрузки.

Традиционно под коэффициентом динамичности понимается отношение максимальных абсолютных величин реального ускорения исследуемого звена механизма к идеальному, рассчитанному только на основе уравнений кинематики. Такой способ расчёта коэффициента динамичности не всегда приемлем для КГШП. Например, при работе пресса в автоматическом режиме идеальное ускорение главного вала равно нулю, соответственно использование коэффициента динамичности теряет смысл. При решении задач, связанных с исследованием влияния на динамику пресса применения различных вариантов технологических схем горячей объёмной штамповки одного и того же изделия, в качестве коэффициентов динамичности предлагается использовать выражения (3) и (4):

$$K_s = \frac{P_{\text{cp}}}{P_{S_{\text{cp}}}}; \quad (4)$$

$$K_m = \frac{P_{\max}}{P_{S_{\max}}}, \quad (5)$$

где P_{cp} , $P_{S_{\text{cp}}}$, P_{\max} и $P_{S_{\max}}$ – соответственно средняя динамическая, средняя статическая, максимальные по абсолютной величине динамическая и статическая нагрузки в исследуемом элементе механизма, рассчитанные на временном отрезке $[T_1, T_2]$. Коэффициент K_m определяет относительный уровень максимальной нагрузки в исследуемом механизме (детали, фрагменте детали) пресса и является показателем прочности. Значение K_s зависит от амплитуды, частоты, скорости затухания колебаний и является

показателем, определяющим износ и усталостное разрушение.

Список литературы

1. Банкетов А.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование / А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.
2. Складчиков Е.Н. Моделирование динамики работы привода кривошипного пресса простого действия // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 4. – С. 30–32.
3. Телегин В.В. Анализ влияния на динамику кривошипного пресса технологических схем штамповки / В.В. Телегин, М.Н. Абдуллах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 4(3). – С. 629–633.
4. Телегин В.В. Динамика механизмов многопозиционных холодноштамповочных автоматов: монография. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 204 с.
5. Телегин, В.В. Технология цифровых прототипов в задачах исследования динамики кузнечно-прессовых машин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4(5). – С. 1306–1309.
6. Телегин И.В. Динамика кривошипного пресса: св. о гос. рег. прог. для ЭВМ Росс. Фед. № 2013618511 от 10.09.2013. Дата поступления 16.07.2013.
7. Телегин И.В. Исследование и совершенствование технологического процесса горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок / И.В. Телегин, И.М. Володин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4(5). – С. 1310–1312.

References

1. Banketov A.N., Bocharov Ju.A. Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie [Forging-and-extruding equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 576 p.
2. Skladchikov E.N. Modelirovanie dinamiki raboty privoda krivoshipnogo pressa prostogo dejstvija [Modeling the dynamics of the drive crank press-action]. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. 1985, no. 4, pp. 30–32.
3. Telegin V.V., Abdullakh M.N. Analiz vlijaniya na dinamiku krivoshipnogo pressa tehnologicheskikh shem shtampovki [Analysis of influence of technological schemes stamping on the dynamics of crank press]. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010, Vol. 12, no. 4(3), pp. 629–633.
4. Telegin, V.V. Dinamika mehanizmov mnogopozitsionnykh holdnoshtampovochnykh avtomatov [Dynamics of mechanisms multiposit i on cold pressing machines]. Monograph V.V. Telegin, Lipetsk, LSTU, 2006, 204 p.
5. Telegin, V.V. Tehnologija cifrovyyh prototipov v zadachah issledovaniya dinamiki kuznechno-pressovykh mashin [The technology of digital prototypes in the tasks of research of dynamics forging and pressing machines]. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, Vol. 14, no. 4(5), pp. 1306–1309.
- 6/ Certificate 2013618511 Russian Federation. Certificate on the state registration of the computer program. The dynamics of the hot-crank press. author I.V. Telegin; applicant and owner Telegin Igor Viktorovich (RU). No. 2013618511; it is declared 16.07.2013; it is published 10.09.2013, Registry of the computer programs, 1 p.
7. Telegin I.V., Volodin I.M. Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa gorjachej objomnoj shtampovki kruglykh v plane pokovok [Research and improvement technology of hot die forging process round in plan view forgings]. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, Vol. 14, no. 4(5), pp. 1310–1312.

Рецензенты:

Володин И.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой механики пластического деформирования, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк;

Козлов А.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.