

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-125-132

УДК 621.735.001.2

ВАРИАНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ФОРМ В ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ ОБРАТНЫМ РАСЧЁТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

VERSION OF THE DETERMINATION WORKPIECE FORMS IN THE DIE FORG- ING OF A REVERSE CALCULATION OF DEFORMATION

Вовченко Арменак Владимирович,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: A_Vovchenko@mail.ru

Vovchenko Armenak V., D.Sc.i (Engineering), Professor

Катрич Оксана Игоревна,

старший преподаватель, e-mail: okatrich_2704@mail.ru

Katrich Oksana I., Senior lecturer

Донской государственный технический университет, кафедра «Технологии формообразования и художественная обработка материалов», 340000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Don State Technical University, chair Technology of a formation of the shape (die Casting and die Forging) and art processing of materials, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1.

Аннотация: Перспективными возможностями характеризуется совершенствуемый расчетных подход, базирующийся на решении обратных задач объемной штамповки. Рассматриваются уже решенные и решаемые проблемы реализации обратного моделирования, позволяющие выполнять расчеты в автоматизированном режиме программными средствами. Современные лицензионные программные продукты моделирования, применяемые в настоящее время в технологическом проектировании, подобными встроенными функциями не располагают.

Актуальность работы определяется исследованием задачи восстановления конфигурации рациональной заготовки по форме готовой поковки, посредством реализации обратного расчета формоизменения. В обратном моделировании выявлена проблема влияния на получаемую форму заготовки условий стационарности особой точки в расчетах, которая и является исследовательской целью работы.

Метод исследования. Посредством гранично-элементного моделирования определены условия для процесса осадки, характеризующие кинематику перемещения особой точки при решении обратной задачи формоизменения. В основе расчетного подхода положен принцип приближенного соответствия процесса деформирования твердого тела и течения вязкой жидкости, рассматриваемый, в том числе, для задачи определения значения кривизны свободной поверхности.

Результаты. Решение определяет рациональные значения угла отставания граничных элементов от инструмента, которые формируют наиболее равномерное деформированное состояние в поковке, в зависимости от условий дискретизации задачи. Полученные зависимости определяют связь формируемого радиуса скругления границы с условиями дискретизации расчетной задачи в области особой точки.

Abstract: The perfected calculating approach based on solving reverse tasks of process die forging is characterized by perspective peculiarities. Both the problems of realizing reverse modeling that have already been solved and are still being solved are considered. They allow to perform calculations in an automated mode by means of software. Nowadays such built-in functions that are applied in technological engineering are not typical of modern licensed software used for modeling.

Topicality. It is defined by a considered problem of investigating the task aiming at restoring the configuration of rational workpiece on the shape of forgings, by means of reverse calculating form altering. In reverse modeling there appeared the problem of affecting the obtained workpiece by the conditions of stationarity of a special (singular) point in reverse calculations. This problem is the aim of the study.

Method of research. By means of boundary element modeling there were determined the conditions characterizing cinematics of moving a special (singular) point when solving the reverse task of form altering the process of settling. The calculating approach is based on approximate correspondence of the solid substance and flowing of ductile liquid deformation process which are also regarded as the task for determining the meaning of

free surface crookedness.

Results of the research. The solution determines the rational meanings of boundary elements lag angle from the tool. These meanings are admitted from the condition of forming evenness and deformed state of the work-piece in dependence of terms discrediting the task. The obtained correlations define the connection of forming boundary rounding radius with the terms of discrediting calculated task in the field of special (singular) point.

Ключевые слова: объёмная штамповка (ОШ), обратная задача формоизменения, алгоритм реверсного нагружения (АРН), прямой метод граничных элементов (МГЭ).

Key words: die forging, the inverse task of forming, algorithm of reverse loading, direct boundary element method (MBE).

В вопросах технологического проектирования процессов горячей и холодной объёмной штамповки (ОШ), приоритетным значением характеризуется проблема определения рациональных форм заготовок или переходных заготовительных форм (и, как следствие, заготовительных ручьев) для изделий – поковок требуемой конфигурации. Рекомендации современной технологической литературы в этой области основываются на результатах исследований двух типов: практических – на производственном опыте изготовления форм, классифицируемых по степени однотипности; теоретических – по результатам применения расчётных подходов к практическим технологическим задачам.

Последние – широко распространены в решении технологических проблем, связанных с изготовлением поковок, имеющих отличия от типовых классификационных форм, особенно в свете развития ряда расчётных методик, базирующихся на современных численных методах моделирования формоизменения (конечных (МКЭ) и граничных (МГЭ) элементов). Применение этих методик позволяет не только снизить расходы на изготовление экспериментальной технологической оснастки, повышая достоверность предварительных проектных предположений о ее эффективности, но и допускает уже на стадии проектирования управление такими показателями продукции, которые в традиционных экспериментальных исследованиях могут анализироваться только после пробной штамповки. И если для процессов штамповки в один переход управление частично может осуществляться изменением параметров стандартных заготовок без существенного изменения оснастки, то изготовление более сложных форм – за несколько переходов, может потребовать замены одного или всех заготовительных ручьев, оборудования (по мощности), средств механизации. А это существенно сказывается на величине расходов, выделяемых на проектные разработки (и на себестоимость изделий впоследствии).

В этом смысле, применение расчетных подходов к проектированию технологических схем штамповки всегда являлось важной научно-технической проблемой, а их совершенствование совместно с методиками применения – актуальной задачей развития кузнечно-штамповочного производства.

При этом процедура использования расчётных подходов даже в пределах применения одного расчётного метода может различаться как по эффективности (рациональности получаемого решения), так и по протяженности приложения методики к решению конкретной технологической задачи (длительности машинного времени).

С позиций эффективности расчётные подходы в приложении к технологии штамповки могут быть: прямыми – совпадающими по направлению с естественным протеканием процесса формоизменения (заготовки – в поковку); обратными – направленными на определение форм заготовок от форм заданных поковок. Прямые задачи, по аналогии с натурным экспериментом, демонстрируют диагностические свойства расчётного подхода, отражая результаты заранее принятого решения – в виде используемой формы заготовки. По этой причине прямые расчёты могут выполняться многократно, до получения удовлетворительных – рациональных результатов процесса формоизменения. Обратные, характеризуясь большей методической сложностью при заранее принятой схеме исполнения поковки и корректности расчётов, уже после однократного применения гарантируют определение такой формы заготовки, из которой можно получать заданную поковку [1]. Этот эффект в приложении к методике проектирования принято именовать «направленностью».

Как следует из сказанного, в силу направленности, сравнительно большей эффективностью в технологическом проектировании характеризуются расчётные подходы, основанные на решении именно обратных задач формоизменения. И, несмотря на то, что в области ОШ первое решение обратной задачи, реализованное методом верхней оценки (МВО), было получено еще в работе [1], до настоящего времени возможности обратного моделирования не реализуются автоматизировано численными методами в современных специализированных лицензионных продуктах (предназначенными для расчёта пластического формоизменения в обработке металлов давлением).

Основные причины отмеченного:

- исходная некорректность обратных задач как класса;
- различающиеся по сложности варианты и возможности применяемых алгоритмов решения обратных задач формоизменения в зави-

симости от используемых в расчётах численных методов моделирования;

- многозначность возможного формообразования деформируемого твердого тела в области особых точек – точек стыка контактной и свободной поверхностей границы, порождающая разнообразие форм заготовок, определяемых расчётом.

Решение проблемы исходной некорректности обратных задач может осуществляться различными способами, один из которых подробно рассмотрен в работе [2].

Вариантность схем реализуемых алгоритмов решения обратных задач в зависимости от применяемых численных методов моделирования подробно рассматривается в работе [3, 4]. В ней, в частности, показано, что в случае применения к решению обратных задач формоизменения прямой формы МГЭ [5] может успешно использоваться алгоритм реверсного нагружения (АРН) совместно с методикой гидродинамических аналогов решений неупругих (нелинейных) задач [6]. Применение АРН посредством фактического рассмотрения процесса формоизменения в обратном направлении без периодического реверсирования кинематических параметров на границе тела, су-

виде (автоматическом или автоматизированном). Ввиду отсутствия подобных функций у современных лицензионных программных продуктов проектирования процессов ОМД, выполняющих моделирование исключительно прямых задач формоизменения, эта возможность определяет существенную значимость и актуальность решаемой проблемы.

Проблема многозначности (многовариантности) результатов возможного расчётного формообразования границы деформируемого твердого тела в области особых точек следует из принципа обращения причинно-следственной связи [7], который положен в основу обратных расчётов. В соответствии с ним, определяемая расчётом предварительная форма заготовки (при любых условиях контактного трения, отличных от идеального [8]), формируется граничными условиями исходя из принимаемой схемы деформируемого состояния, которую определяет разработчик. Иными словами, рассматривая процесс обратного формообразования границы деформируемого тела в особой точке, условия её перемещения (в направлении сокращения контактных участков границы) или стационарности, определяют различные предварительные формы заготовок, каждая из которых

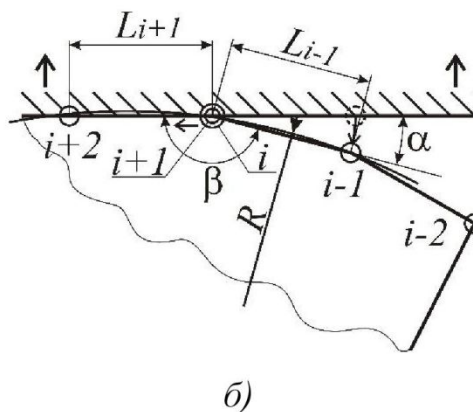
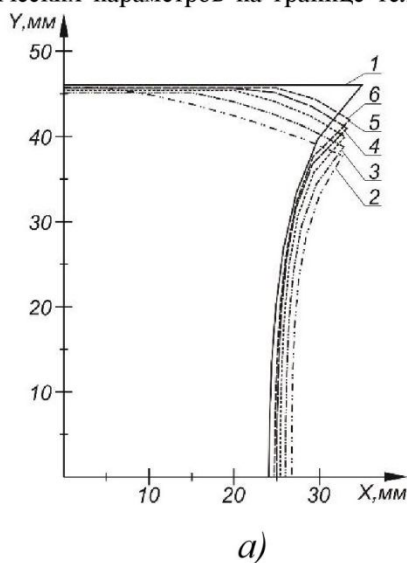


Рис.1. Различие заготовительных форм, получаемых обратным расчетом, в зависимости от условия стационарности особых точек (а) и расчетная схема дискретизации исследуемой области (б):

1. $\alpha \rightarrow \max$; 2. $\alpha = 9^\circ$; 3. $\alpha = 12^\circ$; 4. $\alpha = 15^\circ$; 5. $\alpha = 18^\circ$; 6. $\alpha = 21^\circ$

Fig.1. The difference between the blank forms obtained by the reverse calculations, depending on condition of stationarity the special (singular) points (a) and the calculation scheme of discretization the study area (b):

1. $\alpha \rightarrow \max$; 2. $\alpha = 9^\circ$; 3. $\alpha = 12^\circ$; 4. $\alpha = 15^\circ$; 5. $\alpha = 18^\circ$; 6. $\alpha = 21^\circ$

щественно упрощает схему приложения численного метода к задачам проектного – направленного определения рациональных форм заготовок (для поковок заранее заданной конфигурации). Последнее, в свою очередь, открывает перспективы применения расчётного подхода к задачам проектирования процессов ОШ в программном

обеспечивает выполнение заданной формы (поковки) в прямом направлении (см. рис.1.а).

В первых работах по обратному моделированию в ОШ [1], применение инженерного метода расчета (МВО) с идеализированным представлением геометрии свободных поверхностей в области особых точек, этой специфики почти не учи-

тывало. С развитием расчетных методик и повышением их точности, проблема определения варианта исполнения схемы из множества приобрела актуальность. По этой причине результаты обратного моделирования, как правило, носят субъективный характер, относимый к опыту и интуиции применяющих его разработчиков [9].

Так, например, в работе [10] были сформулированы правила одного варианта перехода материала с контактной поверхности на свободную, в виде геометрического условия сохранения выпуклости – достижения параллельности касательных к свободной поверхности в двух соседних точках на ней. Эти условия позволили получить гладкие выпуклые заготовительные формы, удовлетворяющие требованиям штамповки.

Вместе с тем, вариант предложенного условия – один из возможного множества. Он не учитывает данных работы [11, 12], где показано, что в целях снижения объема облоя и повышения глубины распределения деформации, заготовительные формы могут быть и вогнутыми со стороны свободных зон. Это обстоятельство, а также данные применения обратного моделирования к задачам оптимизации формообразования по алгоритму обратной прогонки динамического программирования [13], позволило предложить альтернативный вариант методики решения вопроса многозначности, более простой и менее строгий в сравнении с оптимизационным. Этот вариант нельзя сравнивать с оптимизационными решениями, но его эффективность с позиций снижения неравномерности деформированного состояния в твердом теле приближается к результатам полученным динамическим программированием и выделяет его из множества интуитивных подходов [14].

В соответствии с обращенным представлением движения деформирования, процесс формообразования изделия квадратного сечения 70x70 мм (рис.1,а), получаемого осадкой плоским инструментом, по АРН [3] может рассматриваться совместно со схемой дискретизации в области особой точки (см. рис.1,б).

Ввиду подобию реологических свойств свинца (при комнатной температуре) и сталей (в температурном диапазонековки и штамповки) [15, 16], принят материал модели – Pb, $t=20^{\circ}\text{C}$. Поскольку критерием оценки является снижаемая неравномерность деформированного состояния (J_5) [17], в последнее время упоминаемый, например, в работе [18] как (J), – глубина его распространения по всему расчётному сечению, граничные условия на

контакте соответствуют условиям формируемой максимальной неравномерности – максимальному контактному трению.

В соответствии с рис.1,б, вводилась условная величина радиуса скругления R граничной поверхности в области особой точки (состоящей из двух граничных узлов: (i) – принадлежащего участку свободной границы и ($i+1$) – принадлежащего контактной поверхности) и двух смежных с ней узлов ($i+2$) и ($i-1$) граничных элементов (длиной $L_{i-1}; L_{i+1}$, соответственно), принадлежащим обоим границам

$$R = \frac{\sqrt{(L_{i+1} + L_{i-1} \cdot \cos \alpha)^2 + (L_{i-1} \cdot \sin \alpha)^2}}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

Методика учета граничных условий в особой точке, состоящей из двойного узла, приводится в работе [4].

Оценка неравномерности распределения накопленной деформации по сечению осуществлялась по параметру [17]

$$J_5 = \frac{\sum |\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{in}| \cdot S_n}{\sum S_n}, \quad J_5 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где ε_{in} и S_n – интенсивность деформации на произвольном (n -ом) участке сечения и площадь этого участка; ε_{cp} – средневзвешенное по площади (объёму) значение интенсивности степени деформации по сечению поковки.

Минимизация параметра J_5 для определения рациональных условий протекания процесса штамповки – условий «отставания» – перемещения особой точки в позицию следующего узла на контактной поверхности (показано стрелкой на рис.1,б), сопряжена со сложностями. Они связаны с тем, что зависимость функции изменения неравномерности от величины абсолютной деформации $J_5(h)$ вначале проявляет линейные свойства (стационарные), а затем – нелинейные (не стационарные). В этой связи минимизации подвергается параметр

$$\frac{J_5}{h} \rightarrow \min \quad (3)$$

где величина h определяется предельным значением абсолютной деформации, при которой коэффициент достоверности аппроксимирующей её функции линейного типа соответствует ограничению

$$r^2 \geq 0.95. \quad (4)$$

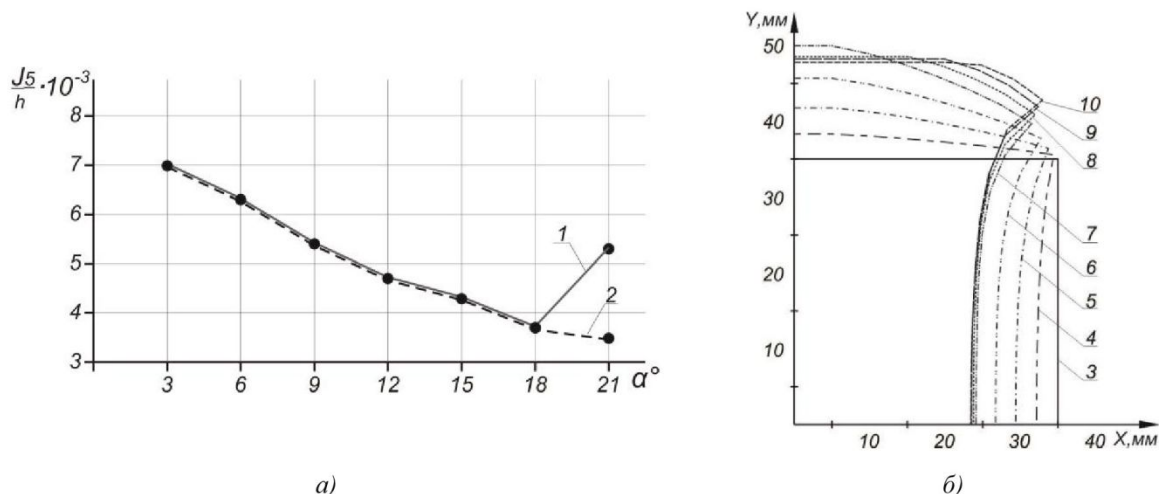


Рис. 2. Влияние значений угла отставания (α°) при обратном моделировании на критерий неравномерности деформированного состояния (при линейной аппроксимации – 1 и нелинейной – 2 функции $J_5(h)$) (а) и на форму получаемых заготовок (б) (поз.3... 10) с углом отставания 3... 21°, соответственно ($\Delta\alpha = 3^\circ$, $L=5$ мм)

Fig. 2. The influence of the lag angle values on the reverse modeling criterion uneven deformed state (with linear approximation – 1 and nonlinear – 2 functions $J_5(h)$) (a) and the shape of the resulting blanks (b) (pos.3...10) with the lag angle 3... 21°, respectively ($\Delta\alpha = 3^\circ$, $L=5$ mm)

Таблица 1 – Варианты замещения членов выражения (7)

Table 1 – Options for the replacement of members the expression

№вар.	$\sigma_{\text{нат.}}$	$\rho_{\text{внутр}}$	$\rho_{\text{внеш}}$	k
1	$\sigma_{(i-1)}$	$\sigma_{(i+2)}$	0	-13,578
2	$\sigma_{(i-1)}$	$\sigma_{(i+1)}$	0	-
3	$\sigma_{(i-1)}$	σ_T	0	-46,676
4	$\sigma_{s(i)}$	$\sigma_{(i+1)}$	$\sigma_{(i)}$	-48,648
5	$\sigma_{s(i)}$	$\sigma_{(i+1)}$	0	4,003
6	$\sigma_{s(i)}$	$\sigma_{i(6)}$	$\sigma_{(i)}$	-62,123
7	$\sigma_{s(i)}$	$\sigma_{i(6)}$	0	-55,782

Моделирование обратного формоизменения на первом этапе исследований осуществлялось при условии дискретизации границы элементами $L_{i-1} \approx L_{i+1} \approx 5$ мм до выполнения условий $\alpha = 3^\circ \dots 21^\circ$, $\Delta\alpha = 3^\circ$. Результатом моделирования являются данные, представленные на рис.2,а, из которого следует, что условие миними-

зации удельных значений J_5/h (3) на стационарных стадиях деформирования достигаются при величине угла отставания $\alpha \approx 18^\circ$, которому соответствует значение радиуса скругления $R_{18} = [R] \approx 15.6$ мм.

Используя значение $[R]$ и длины граничных элементов, стыкующихся в особой точке, можно определить предельный угол отставания элемента

(L_{i-1}) от поверхности инструмента, при котором можно переносить особую точку $((i), (i+1))$ в следующий после нее контактный узел $(i+2)$

$$\alpha = 180 - \beta \quad (5)$$

$$\beta = \arccos \frac{L_{i+1}}{2 \cdot [R]} + \arccos \frac{L_{i-1}}{2 \cdot [R]},$$

где

Именно выражение (5) позволяет получить, контролируемый по стадиям расчетного обратного формоизменения параметр, определяющий такую форму заготовки из множества, которая обеспечивает наименьшую скорость и величину неравномерности формируемого деформированного состояния в рассматриваемом сечении.

Различающиеся условия скорости отставания материала заготовки от прямолинейного участка штампа порождают и различные значения обратной абсолютной деформации, формируя сечения заготовок различной высоты (рис.2,б). По этой причине, помимо условий стационарности при определении формы учитывалось условие потери вертикальной устойчивости, выражаемое в виде

$$\frac{Y_{\max}}{X_{\min}} \leq 2.0 \dots 2.5 \quad (6)$$

где в числителе и знаменателе находятся значения максимальной высоты и минимальной ширины сечения, соответственно.

Величину образования радиуса можно пояснить и с позиции классической гидромеханики (по аналогии с методом гидродинамических приближений при расчете формоизменения твердого тела [6]), воспользовавшись известным выражением

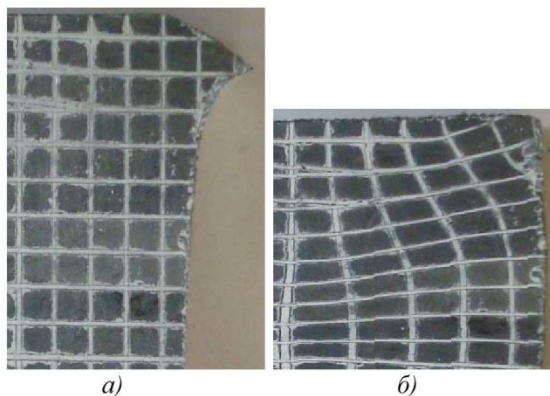


Рис. 4. Результаты физического эксперимента (Pb, $t=20^\circ\text{C}$) штамповки осадкой фасонной заготовки (а) в поковку квадратного сечения (б) при величине осадки $h=45.6\text{ мм}$

Fig.4. The results of physical experiments (Pb, $t=20^\circ\text{C}$) forming the process of settling workpiece (a) into the forgings of square section (b) when the magnitude of settling $h=45.6\text{ mm}$

[19, 20]

$$R = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{нат}}}{P_{\text{внутр}} - P_{\text{внеш}}} \quad (7)$$

в котором компоненты натяжения поверхностного слоя σ и давлений внутри и снаружи «пузыря» могут быть представлены компонентами схем напряженно-деформированного состояния в области особой точки совместно с корректирующим коэффициентом k . Рассматривались несколько вариантов, аналогия замещения которыми представлена в таблице 1.

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

- $\sigma_{(i-1)}$, $\sigma_{(i+1)}$, $\sigma_{(i+2)}$ – гидростатическое давление в точке $(i-1)$, $(i+1)$, $(i+2)$ соответственно;
- $\sigma_T = 5\text{ МПа}$ – предел текучести Pb, $t=20^\circ\text{C}$;
- $\sigma_{(в\text{ объеме})}$ – интенсивность напряжений в объеме деформируемого сечения тела;
- $\sigma_{(i)}$ – касательное напряжение, действующее в граничной точке (i) .

Наиболее стабильными значениями параметра k отличается вариант №4, который не зависит от параметров геометрического удаления точек приложения переменных, получаемых расчётом:

$$R = k \frac{2 \cdot \sigma_{s(i)}}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \quad (8)$$

В результате исследований было установлено, что при дискретизации рассматриваемой задачи граничными элементами, длина которых близка к 5 мм, угол отставания (α) формирующий мини-

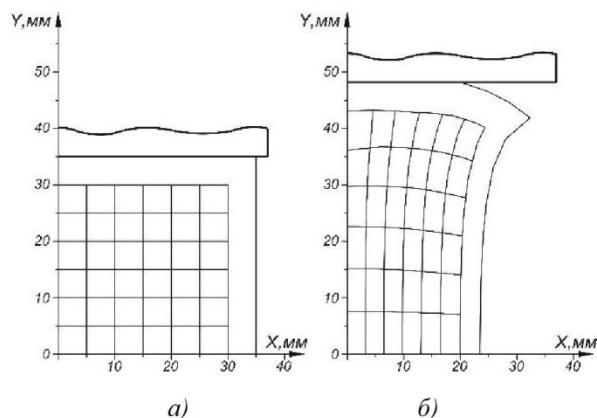


Рис. 3. Дискретизация поковки (а) и заготовки (б), полученной обратным расчетом по рекомендуемому варианту ($R=15.6\text{ мм}$, $L=5\text{ мм}$, $\alpha=18^\circ$)

Fig. 3. Discrediting the forgings (a) and workpiece (b) obtained by the reverse calculation on recommended variant ($R=15.6\text{ mm}$, $L=5\text{ mm}$, $\alpha=18^\circ$)

мальную неравномерность деформированного состояния (наибольшее распространение деформации в сечении поковки) составляет 18° (рис.3). Учитывая условие дискретизации, установлено, что эти данные соответствуют радиусу $R=15.6\text{ мм}$ (см.выр.(1)) при абсолютной деформации $h=45.6\text{ мм}$. Располагая уже известным значением R для используемого материала, можно заранее определить по формуле (5) условие его отставания от плоской поверхности штампа – при достижении этих величин в процессе расчета обратного формоизменения.

Наглядными результатами исследований являются данные эксперимента, представленные на рис.4. На нем приводится наиболее рациональная форма фасонной заготовки, полученная обратным расчетом для варианта с параметрами $\alpha=18^\circ$, $L=5\text{ мм}$, $R=15.6\text{ мм}$. Аналогично предшествующим данным, приводятся картины 1/4 рассматриваемого сечения. На них иллюстрируется как нестационарность течения внутри поковки (двойное бочкообразование), так и способность выполнения требуемой формы поковки даже на участке свободной поверхности, длина которого в конце процесса составляет не менее 50%.

Таким образом, рассматриваемую методику можно использовать в качестве алгоритма для программных продуктов, применяемых в моделировании обратного формоизменения в технологических процессах объемной штамповки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reznikov Yu.N. Calculation of shape and dimensions of semiproducts in processes of die forging using upper evaluation // Steel in the USSR- February. 1979. pp. 78-82.
2. Вовченко А.В., Резников Ю.Н., Соловьёв А.Н. О возможности улучшения решений обратных задач расчёта формоизменения в процессах ОМД. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион.

Технические науки, 2009. №3. С. 60-64.

3. Вовченко А.В. О перспективных особенностях применения метода граничных элементов в современном проектировании процессов объёмной штамповки и решении обратных задач формоизменения // Справочник. Инженерный журнал, 2012. №3. С. 16-22.

4. Park J.J., Rebelo Nuno, Kobayashi Shiro. A new approach to perform design in metal forming with the finite element method // Jnt. J. Mach. Tool Des. and Res. 1983. No.1. pp. 71-79.

5. Brebbia C.A., Telles J.C.F., Wrobel L.C. Boundary element Techniques. Theory and applications in engineering // Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984. 464 p.

6. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1969. 108с.

7. Castro C.F., Antonio C.A.C., Sousa L.C. Optimization of shape and process parameters in metal forging using genetic algorithms // J.of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 146. Is. 3. pp. 540-545.

8. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.

9. Резников Ю.Н., Вовченко А.В., Быкодоров А.В. Уменьшение длительности стадии доштамповки на основе моделирования формоизменения // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД, 2001. №4, С. 33-36.

10. Володин А.И. Повышение качества круглых в плане поковок на основе совершенствования технологии штамповки: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением. Липецк, 2010. 23 с.

11. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 560 с.

12. Титов Ю.А., Кокорин В.Н., Морозов О.И. Технологияковки и объёмной штамповки: учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2016. 111 с.

13. Reznikov Yu.N., Vovchenko A.V., Zhilenkov V.E. On the optimization of metal forming // Russian Metallurgy (Metally), Pleiades Publishing, Inc. (Dover, St. of Delaware, USA). Vol. 2006, No.1. pp. 33-37.

14. Zhao Xinhai, Zhao Guogun, Wang Guangchun, Wang Tonghai. Optimal perform die design through controlling deformation uniformity in metal forging // J. Mater. Sci. and Technol. 2002. Vol. 18. No. 5. pp. 465-467.

15. Выдрин В.Н., Агеев Л.М. О реологических свойствах стали и свинца // Изв. АН СССР «Металлы», 1967. №2. С. 104-106.

16. Ганиев М.М., Шибиков В.Г. Панкратов Д.Л., Шибиков Р.В. Влияние горячей и холодной деформации выдавливанием на свойства сплава свинца и алюминия // Металлы, 2015. №4. С. 87-92.

17. Резников Ю.Н., Калинин Г.Г. Оптимизация заготовительных ручьев для поковок, изготавливаемых объёмной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство, 1998. №10. С. 8-10.

18. Железков О.С., Мухаметзянов И.Ш., Малаканов С.А. Поиск эффективной технологии волочения проволоки трапецевидного профиля на основе комплексного критериального подхода // Известия ТулГУ. Технические науки, 2017. №3. С. 25-34.

19. Элементарный учебник физики: учеб. пособие под ред. Г.С. Ландсберга. В 3 т. Т.1. Механика. Теплота. Молекулярная физика. 14-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. С. 472-476.

20. Никеров В.А. Физика: современный курс: учебник. 2-е изд. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2016. 452 с.

REFERENCES

1. Reznikov Yu.N. Calculation of shape and dimensions of semiproducts in processes of die forging using upper evaluation // Steel in the USSR- February. 1979. pp. 78-82.

2. Vovchenko A.V., Reznikov Yu.N., Solovov A.N. O vozmozhnosti uluchsheniya resheniy obratnykh zadach rascheta formoizmeneniya v protsessakh OMD. // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskies nauki, 2009. No. 3. pp. 60-64.

3. Vovchenko A.V. O perspektivnykh osobennostyakh primeneniya metoda gra-nichnykh elementov v sovremennom proektirovanii protsessov obemnoy shtampovki i reshenii obratnykh zadach formoizmeneniya // Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal, 2012. No. 3. pp. 16-22.

4. Park J.J., Rebelo Nuno, Kobayashi Shiro. A new approach to perform design in metal forming with the finite element method // Jnt. J. Mach. Tool Des. and Res. 1983. No.1. pp. 71-79.

5. Brebbia C.A., Telles J.C.F., Wrobel L.C. Boundary element Techniques. Theory and applications in engineering // Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984. 524 p.

6. Alekseev Yu.N. Vvedenie v teoriyu obrabotki metallov davleniem, prokatkoy i rezaniem. Kharkov: Publishing of Kharkov University, 1969. 108 p.

7. Castro C.F., Antonio C.A.C., Sousa L.C. Optimization of shape and process parameters in metal forging using genetic algorithms // J.of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 146. Is. 3. pp. 540-545.
8. Tikhonov A.N., Kalner V.D., Glasko V.B. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov i metod obratnykh zadach v mashinostroenii. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 264 p.
9. Reznikov Yu.N., Vovchenko A.V., Bykodorov A.V. Umenshenie dlitelnosti stadii doshtampovki na osnove modelirovaniya formoizmeneniya // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. OMD, 2001. No. 4, pp. 33-36.
10. Volodin A.I. Povyshenie kachestva kruglykh v plane pokovok na osnove sovershenstvovaniya tekhnologii shtampovki: avtoreferat na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.02.09 – tekhnologii i mashiny obrabotki davleniem. Lipetsk, 2010. 23 p.
11. Okhrimenko Ya.M. Tekhnologiya kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 560 p.
12. Titov Yu.A., Kokorin V.N., Morozov O.I. Tehnologiya kovki i obemnoi shtampovki: uchebnoe posobie. Ulyanovsk : Ulyanovskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet, 2016. 111 p.
13. Reznikov Yu.N., Vovchenko A.V., Zhilenkov V.E. On the optimization of metal forming // Russian Metallurgy (Metally), Pleiades Publishing, Inc. (Dover, St. of Delaware, USA). Vol. 2006, No.1. pp. 33-37.
14. Zhao Xinhai, Zhao Guogun, Wang Guangchun, Wang Tonghai. Optimal perform die design through controlling deformation uniformity in metal forging // J. Mater. Sci. and Technol. 2002. Vol. 18. No. 5. pp. 465-467.
15. Vydrin V.N., Ageev L.M. O reologicheskikh svoystvakh stali i svintsa // Izv. AN USSR «Metally», 1967. No. 2. pp. 104-106.
16. Garniev M.M., Shibakov V.G., Pankratov D.L., Shibakov R.B. Vliyanie goryachei i holodnoi deformatsii vidavlivaniem na svoistva splava svintsa i alyuminiya // Metally, 2015. No. 4. pp. 87-92.
17. Reznikov Yu.N., Kalinin G.G. Optimizatsiya zagotovitelnykh ruchevev dlya pokovok, izgotovlyaemykh obemnoy shtampovkoy // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo, 1998. No. 10. pp. 8-10.
18. Zelezkov O.S., Muhametzyanov I.Sh., Malakanov S.A. Poisk effektivnoi tekhnologii volocheniya provoloki trapecievidnogo profilya na osnove kompleksnogo kriterialnogo podhoda // Izvestia Tul'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2017. No. 3. pp. 25-34.
19. Elementarnyy uchebnyk fiziki: uchebnoe posobie pod redakciei G.S. Landsberga. V 3 t. T.1. Mekhanika. Teplota. Molekulyarnaya fizika. 14-e izd. Moscow: FIZMATLIT, 2010. pp. 472-476.
20. Nikerov V.A. Fizika: sovremennii kurs: uchebnyk. 2-e izd. Moscow: Izdatelsko-torgovaya korporatsiya «Dashkov I K», 2016. 452 p.

Поступило в редакцию 12.02.2018

Received 12.02.2018