

Выбор рациональных параметров мостика облойной канавки при моделировании открытой штамповки

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"

Разработана методика моделирования процесса пластического течения материала при объемной штамповке с облоем. Методика основана на проведении полнофакторного численного эксперимента. Учтены различные факторы, влияющие на результат штамповки, а именно параметры заготовки, углы наклона мостика штампа. Показано, что полный учет всех влияющих параметров позволяет выбрать рациональную геометрию облойной канавки. Несимметричное истечение материала в облой требует несимметричной геометрии канавки мостика облойной канавки. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: объемная штамповка, облой, канал мостика, мостик облойной канавки, моделирование, пластическое течение.

Введение

Кузнечно-штамповочное производство (КШП) занимает немаловажное место в заготовительном производстве авиационной промышленности. В среднем до 23 тысячи наименований различных деталей производят из штампованных заготовок, что поясняется требованиями, предъявляемыми к деталям критического применения, таких, как элементы крепления, силовые элементы каркаса [1].

Эффективность КШП и качество его продуктов зависят от методов их проектирования, при которых сравнивают технологические схемы, выбирают рациональные параметры, которые влияют на коэффициент использования материала, требуемое усилие деформирования и наличие дефектов конечного продукта, а также стойкость инструмента.

Для разработки открытой объемной штамповки актуальным являются вопросы различных CALS-технологий, что позволяет существенно уменьшить сроки запуска новой продукции и снизить затраты. Одним из таких направлений является использование систем конечно-элементного анализа.

Известно несколько программ, нашедших широкое применение, таких, как Forge, Q-Form, Deform. Данные продукты позволяют с достаточной точностью прогнозировать напряженно-деформированное состояние, течение материала, наличие дефектов и даже изменение микроструктуры материала при штамповке. С другой стороны, использование моделирования для непосредственного проектирования инструментов до сих пор сдерживается не столько из-за особенностей самих систем, сколько благодаря недостаточной разработке некоторых вопросов в традиционных процессах, например, таких, как открытая объемная штамповка.

Методика расчета параметров этого процесса основана только на опыте и инженерной интуиции. В этой работе предпринята попытка заменить применяемый подход научно-обоснованным методом выбора геометрии облойной канавки при штамповке сложных по форме поковок типа «кронштейн» с переменным вдоль продольной оси сечением.

Эта операция связана с некоторыми проблемами, прежде всего с дефектами типа неполного заполнения гравюры штампа, чрезмерным его износом, а также значительным расходом металла в облой. Традиционным способом решения такой проблемы является применение многоручьевого штамповки, что повышает

стоимость инструмента, расход материала, увеличивает трудоемкость. Альтернативным вариантом, позволяющим снизить количество переходов, является обеспечение переменного сопротивления истечению материала в облой, что требует особых методов проектирования облойной канавки.

Постановка задачи исследования

Одна из первых попыток реализовать положение о том, что геометрия облойной канавки должна быть «оптимальной», сделана в работах А. А. Фельде [2]. Была предложена методика оптимизации параметров открытых штампов с центральным компенсатором при штамповке осесимметричных поковок. В работе констатировалось отсутствие научно обоснованных рекомендаций по выбору параметров облойных мостиков окончательных штампов, что приводит к перерасходу металла. По этой методике определяли параметры открытых ручьев, обеспечивающие минимальные значения расхода металла при ограничениях по силовым характеристиками процесса.

В работе [3] с помощью численного моделирования НДС была поставлена задача определения параметров облойных мостиков открытых ручьев, обеспечивающих минимальный отход металла. При этом вычисление таких параметров сводилось к общей задаче линейного программирования.

В практике объемной штамповки на молотах и прессах широко применяют облойные мостики с параллельными плоскостями. Однако за последнее время в некоторых случаях используют мостики, сечение которых представляет собой постепенно сужающийся канал. Форма облойного мостика оказывает влияние не только на напряженное состояние, но и на распределение скоростей течения металла в облойном канале. Можно сказать, что для сужающихся облойных канавок площадь диаграмм напряжений значительно больше, чем для канавок с параллельными плоскостями, что приводит к увеличению потребного для деформации облоя усилия. Одновременно с этим здесь происходит увеличение давления в полости штампа, равное приросту напряжения у входа в мостик, которое способствует лучшему заполнению гравюры штампа. Обратная картина получается для расширяющейся облойной канавки – суммарное потребное усилие падает, но падает и давление в полости штампа.

Таким образом, облойные мостики с расширяющимся каналом работают в более благоприятных условиях по сравнению с другими мостиками, что позволяет уменьшить износ оборудования и инструмента и тем самым повысить точность изготавливаемых поковок. Особенно целесообразно применение таких облойных мостиков при штамповке поковок несложной формы, когда для заполнения гравюры не требуется высокого давления в полости штампа. При штамповке поковок со сложной конфигурацией в вертикальном сечении лучше применять мостик с суживающимся каналом, так как он создает большее давление в полости штампа и обеспечивает лучшее оформление поковки.

Что касается соотношения размеров, то в некоторой литературе постулируется равнозначность варьирования как высоты мостика, его ширины, так и соотношения их размеров. В то же время авторы работы [4] находят, что гораздо большее влияние оказывает высота мостика, чем его ширина. Кроме того, необходимо учитывать его относительные размеры.

Вопрос оптимальной геометрии расширяющихся облойных канавок был подробно рассмотрен в работе [5] для случая штамповки осесимметричной поковки.

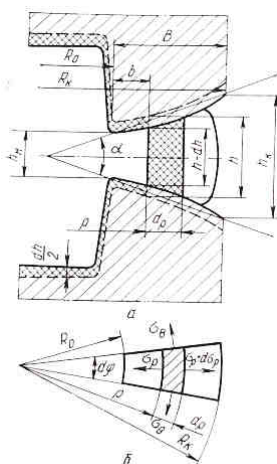


Рисунок 1 – Схема отслоения обля при доштамповке: а – боковой вид обля; б – напряженное состояние элемента сектора обля [5]

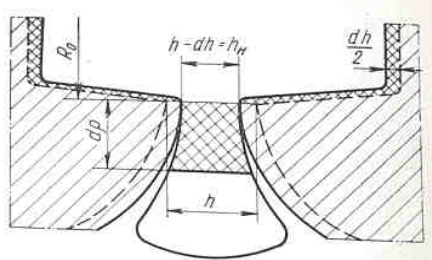


Рисунок 2 – Схема образования свободно вытекающего обля [5]

Минимальный износ канавки и уменьшение потребной нагрузки можно определить из условия отсутствия деформирования обля при смыкании штампов, когда он как бы «отслаивается» от поверхности порога мостика, т.е. при уменьшении начальной высоты щели происходит свободное вытекание металла.

Профиль образующегося обля может быть получен путем рассмотрения уравнения расхода металла через цилиндрическую поверхность радиуса R_0 . Если профиль щели h облойной канавки выполнить по полученному уравнению (1), то облой при смыкании штампов до принятого в уравнении значения начального зазора на пороге мостика отслаивается от поверхности порога мостика и перестает деформироваться инструментом. При дальнейшем уменьшении начальной высоты щели происходит свободное вытекание металла за пределы гравюры штампа (рис. 2).

$$h = h_n e^{2\left(\frac{\rho}{R_0} - 1\right)} \quad (1)$$

Толщина обля при его свободном вытекании будет равна

$$\delta = h_n \exp\left[2\left(\frac{\rho}{R_0} - 1\right) - m \ln\left[\frac{\rho}{R_0}\right]\right] \quad (2)$$

Таким образом, уравнение (2) описывает наибольшую толщину недеформируемого штампами обля. Если геометрию облойной канавки выполнить в соответствии с этим выражением, то при доштамповке вследствие отслоения обля полностью исчезнут нормальные напряжения на поверхности порога облойной канавки, что приведет к снижению общего усилия деформирования и повышению стойкости оснастки. Плавный переход от гравюры штампа к облою также способствует повышению стойкости таких канавок. В некоторых случаях для упрощения изготовления криволинейный профиль щели может быть заменен прямолинейным. В этом случае угол наклона в одной половине штампа определяют из гео-

метрических соображений (рис. 1.2, а):

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{h_k - h_n}{2B} = \frac{h_n}{R_0} \left(1 + \frac{B}{2R_0^2} \right) \quad (3)$$

Большой угол применять нецелесообразно, так как это приведет к преждевременному отслоению металла, снижению сопротивления канавки на ранних стадиях штамповки, более интенсивному износу внутренней кромки порога [5].

Что касается облойных канавок переменных, вдоль периметра параметров, то в литературе [6] указаны следующие рекомендации. Если более сложный элемент преобладает в общей форме поковки, то рекомендуется вдоль всего периметра ручья применять облойную канавку одинаковой ширины в соответствии с формой поперечного сечения сложного элемента. Если же более сложный элемент поковки составляет сравнительно небольшую ее часть, то для него можно установить большую ширину облойной канавки в соответствии с формой его поперечного сечения, чем на остальном периметре поковки.

Если контур облойной канавки, построенный на поверхности разреза штампа, получается многоступенчатым и сложной формы, то в целях его упрощения рекомендуется принять по таблице общую ширину $b+b_1$ выдерживать лишь на некоторых участках контура, а на остальных участках контура общая ширина канавки должна быть больше. Упрощать контур облойной канавки следует только корректированием ширины магазина b_1 , сохраняя неизменной ширину мостика на всех участках [6].

Таким образом, видно, что в литературе отсутствует точно выверенная методика определения параметров облойной канавки, существуют только самые общие рекомендации по выбору того или иного типа канавки в зависимости от сложности и простоты данной поковки. Мало того, данные рекомендации часто противоречат друг другу. Так, если принять рекомендованные по [6] параметры мостика облойной канавки, то не будут учтены глубина и ширина рабочих ручьев, а следовательно, и сопротивление, оказываемое течению материалу при их заполнении. Глубина ручьев по справочникам влияет только на величину принимаемого радиуса закругления облойной канавки. Приведенные выше рекомендации об изменении ширины магазина и ширины канавки противоречат всем принятым в справочной литературе правилам, согласно которым в первую очередь надо варьировать толщину облоя. При этом принимают во внимание полноту заполнения облоя в зависимости от сложности поковки, что свидетельствует о принятом преобладающем влиянии прежде всего величины облоя и создаваемом им сопротивлении боковому вытеканию материала в облойную канавку.

Обращает на себя внимание полное отсутствие учета влияния на конструкцию облойной канавки относительных размеров рабочего ручья и исходной заготовки, т.е. при проектировании облойной канавки заранее предполагают, что заготовка имеет некие «оптимальные» параметры, полученные на основании диаграммы сечений получаемой поковки, а это противоречит необходимости минимизации количества переходов штамповки. Кроме того, вызывает сомнение рекомендация о применении симметричного канала мостика, так как картина истечения материала явно несимметрична.

Представляется целесообразным при проектировании мостик объемной канавки разбивать на участки с постоянными и переменными параметрами мостика. Кроме того, в разных зонах необходимо учитывать различные типы заполнения рабочих ручьев (осадкой, выдавливанием и по комбинированной схеме), что определяет сопротивление заполняющему их металлу, а также учитывать относи-

тельные размеры ручья и заготовки.

Метод решения

При проведении полнофакторного численного эксперимента необходимо было проверить и сравнить между собой, прежде всего, влияние на результат операции объемной штамповки с облоем следующих факторов: ширины мостика, толщины облоя, углов наклона верхней и нижней половин канала мостика, а также различных соотношений объемов рабочего ручья и заготовки.

Для проведения численного эксперимента в качестве типовой выбрана поковка типа «кронштейн» (рисунок 3). Такая поковка наиболее типична среди поковок с вытянутой продольной осью и со значительной разницей в поперечных сечениях. Заготовку целесообразно разделить на зону с затрудненным заполнением гравюры штампа (фланец) и зону, где это сопротивление минимально (стержень). Кроме того, заполнение гравюры при штамповке такой поковки включает в себя как осадку, так и выдавливание.

Нами исследованы особенности заполнения второго элемента рабочего ручья штампа на основе методов, снижающих потребное усилие штамповки и износ штампа. При этом объем заусенца будет превышать рекомендуемый вследствие большего сечения исходной заготовки, так как необходимо предусмотреть запас материала для заполнения фланцев.



Рисунок 3 – Поковка типа «кронштейн»

Для оценки влияния различных факторов выполняем следующее:

- 1) Выбираем зону, в которой сопротивление затеканию материала в ручей минимально, т.е. элемент поковки в виде Т-образного профиля, поперечное сечение которого намного меньше сечения в зонах фланцев. При этом проблема сводится к плоскому деформированию, т.к. течением в продольном направлении можно пренебречь;
- 2) основные параметры облойной канавки рассчитываем согласно [6];
- 3) варьируемыми факторами принимаем толщину облоя и углы наклона площадки канала мостика, основные значения которых определяем согласно уравнению (3). Необходимо проверить правильность назначения этого значения для обеих половин штампа. $\alpha = 13^\circ$;
- 4) проверяем влияние увеличения объема исходной заготовки по сравнению с рекомендуемыми согласно [6];
- 5) проверяем влияние увеличения сопротивления затеканию материала в рабочий ручей путем изменения геометрии последнего;
- 6) после анализа результатов делаем выводы.

Чтобы найти решение, в системе КЭ анализа было смоделирована плоская деформация в сечении, перпендикулярном продольной оси типовой штампованной поковки типа «кронштейн» (рисунок 3). Заготовка была выбрана из стандарт-

ного сортамента прутка 25×25 мм, что включает в себя около 35 % облоя.

Заготовка разбита на 5150 конечных элементов (КЭ), притом в местах контакта с поверхностями облойной канавки, где предполагается наибольшие градиенты параметров, сетка КЭ уточнена в три раза. Нижняя и верхняя половины штампа приняты жесткими телами. Временной интервал разбит на 200 шагов. Материал заготовки принят АК-6, пластически деформируемый.

В качестве пробной была проведена серия экспериментов для определения совместного влияния толщины облоя и угла наклона расширяющегося канала на потребную работу энергии деформирования. Диаграмма зависимости для диапазона стандартных величин толщин облоя согласно справочным данным от 1,2 до 2,2 мм показана на рисунке 4.

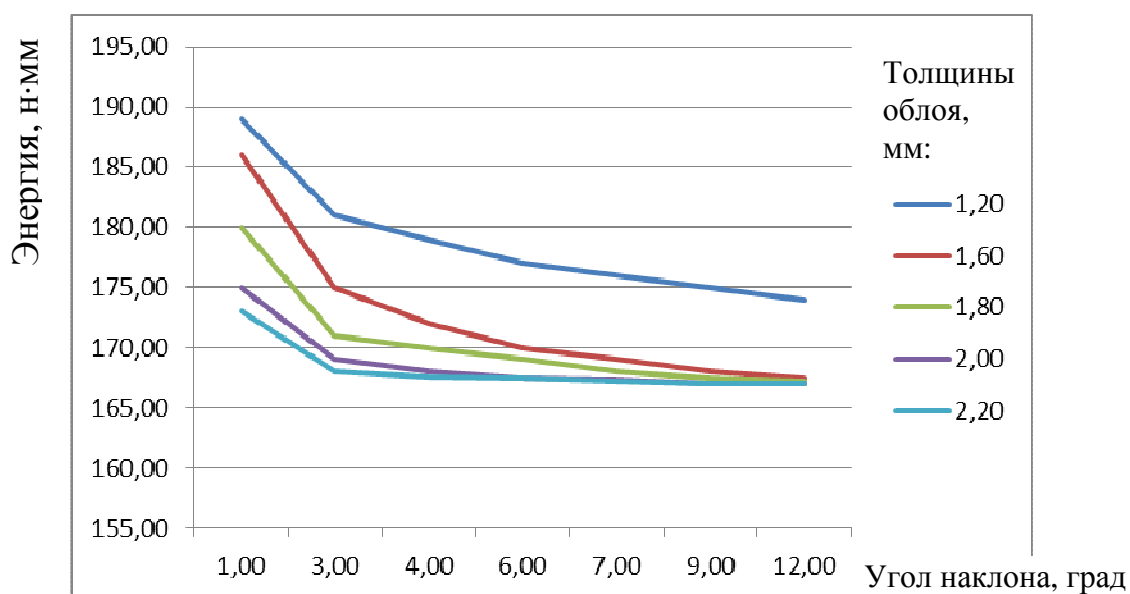


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости энергии деформирования от параметров облойной канавки.

Очевидно, влияние угла наклона существенно возрастает при уменьшении наклона до 3°. То же можно заметить и относительно критической толщины облоя 1,6 мм.

Так как истечение материала носит явно несимметричный характер, то, очевидно, и канал мостика должен быть несимметричный. В еще большей степени это относится к процессам, осуществляемым на молотах: общеизвестен факт более легкого заполнения ручьев в верхней половине штампа.

В целях определения отклонения центральной линии канала мостика от горизонтального положения сперва был смоделирован канал с горизонтальной верхней частью. На рисунке 5 показан результат моделирования. Видно, что облой осаживается полностью в канале мостика до момента выхода в магазин (а), а контакт с верхней половиной сохраняется вплоть до конца рабочего хода. Кроме того, оказалось, что такая форма канала приводит к тому, что осадка вследствие контакта с нижней половиной магазина продолжается и в нем (б).

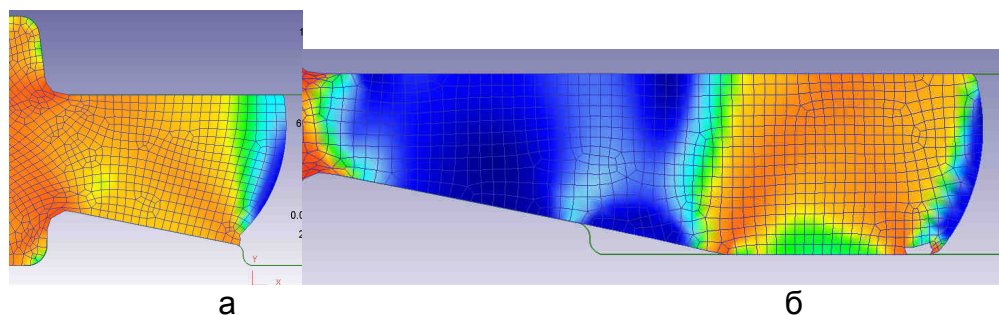


Рисунок 5 – Результат моделирования течения облоя в канале с горизонтальной верхней половиной: а – момент выхода в магазин; б – повторная осадка облоя в магазине

Следующей серией виртуальных экспериментов была проверка влияния симметричного канала мостика (рисунок 6). В этом случае происходит отрыв только от нижней половины канала (а), с верхней же частью контакт сохраняется до конца рабочего хода (б).

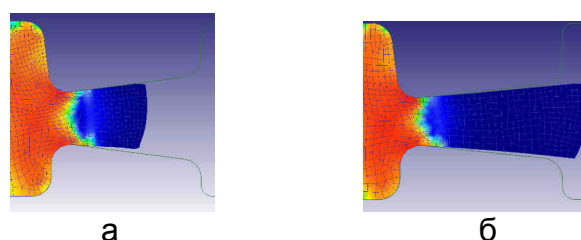


Рисунок 6 – Результат моделирования течения облоя в канале с симметричным каналом мостика: а – момент отрыва от нижней половины ; б – момент выхода в магазин

В результате следующей серии виртуальных экспериментов было проверено влияние несимметричного канала мостика. Была проведена серия экспериментов, при котором варьировался наклон нижней половины канала в диапазоне от 0 до 6° и для верхней половины от 6 до 18° (6° – рекомендуемый наклон для симметричного канала согласно [5]) с шагом 2°. Результат показан на рисунке 7. Как видно, при наклоне нижней половины 4° и верхней 15° отрыв облоя происходит практически одновременно, что приводит к отсутствию его осадки вплоть до окончания штамповки.

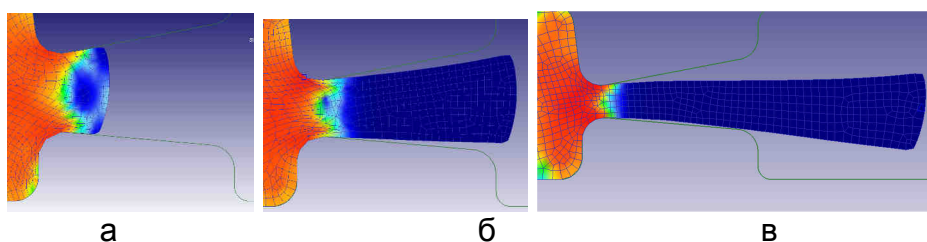


Рисунок 7 – Результат моделирования течения облоя в канале с наклоном нижней части 4° и верхней 15°: а – момент одновременного отрыва облоя; б – момент выхода в магазин; в – окончание штамповки

Так как объем облоя непосредственно влияет на условия течения облоя в районе мостика, была проведена серия экспериментов с увеличенным объемом облоя с аналогичной геометрией канавки. На рисунке 8 показано, что отсутствие осадки облоя также имеет место.

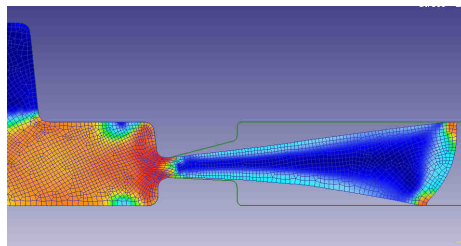


Рисунок 8 – Результат моделирования течения облоя увеличенного объема в канале с наклоном нижней части 4° и верхней 15° (окончание штамповки)

Для определения влияния относительных размеров рабочего ручья штампа для приведенных выше параметров ручья штампа был изменен размер ребра, которое заполняется выдавливанием. Результат показан на рисунке 9. Очевидно, что дефект формируется в виде незаполнения ручья, хотя все параметры облойной канавки остаются рассчитанными согласно рекомендованным.

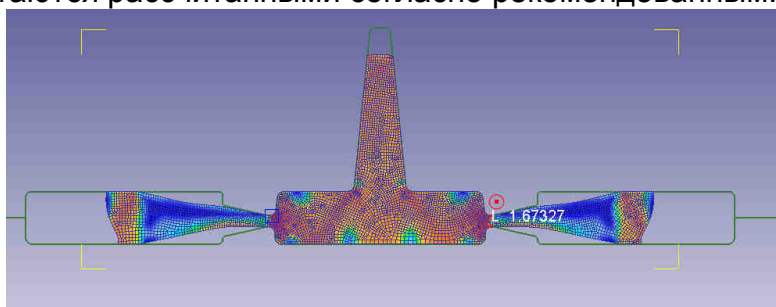


Рисунок 9 – Результат штамповки с аналогичными параметрами мостика облойной канавки при увеличенной глубине ручья

Выводы

1. Моделирование пластического течения для деталей с вытянутой осью и значительной разницей в поперечных сечениях типа «кронштейн» можно сводить к плоской задаче только для элементов типа «стержень» и «ребро жесткости», где допустимо упрощать задачу до плоской деформации.

2. Для моделирования течения в элементах типа «фланец» необходимо проводить трехмерное моделирование, где возможен учет деформаций в продольном сечении.

3. Для определения рациональных параметров облойной канавки совершенно не достаточно учитывать поперечные размеры и периметр поковки, что следует из справочной литературы. Необходимо принимать во внимание относительные размеры и глубины рабочих ручьев штампа, так как необходимое для полного заполнения относительно глубокой и узкой гравюры давление должно быть существенно выше.

4. Рекомендуемый в справочной литературе учет размеров магазина для рассмотренной проблемы не имеет решающего значения. Основное влияние на величину потребной работы деформации оказывает толщина облоя в зоне затекания в канал мостика, угол наклона площадок мостика, относительные размеры рабочего ручья штампа, а также исходный объем заготовки.

5. Применение расширяющихся каналов мостика штампа может значительно снизить контактные напряжения на поверхностях штампа. В то же время картина течения облоя в канале мостика штампа значительно отличается от симметричной, что требует применения различных углов наклона для верхней и нижней

половин канала мостика. В результате моделирования определена рациональная геометрия мостика облойной канавки.

На основе проведенных виртуальных экспериментов планируется дальнейшее моделирование объемной задачи пластического деформирования при открытой штамповке в целях уточнения рациональных параметров облойной канавки.

Список литературы

1. Современные технологии авиастроения [Текст] / под общ. ред. А. Г. Бра-тухина, Ю. Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
2. Фельде, А. А., Оптимизация параметров открытых штампов и технологи-ческие нагрузки [Текст] / А. А. Фельде, В. Г. Каплунов // Изв. высш. учеб. заведе-ний. Черная металлургия. – 1986. – № 10. – С. 33 – 38.
3. Каплунов, Б. Г. Развитие теории и технологии процессов горячей объем-ной штамповки на основе моделирования напряженно-деформированного состоя-ния: Дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 1998. – 494 с.
4. Фельде, А. А. К выбору параметров закрытых ручьев [Текст] / А. А. Фель-де, В. Г. Каплунов // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 1986. – № 10. – С. 57 – 62.
5. Охрименко, Я. М. Особенности течения металла в расширяющейся об-лойной щели открытого штампа [Текст] / Я. М. Охрименко, В. Ю. Ненашев, А. В. Юшков // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 1975. – № 8. – С. 82 – 85.
6. Семенов, Е. И. Ковка и штамповка [Текст]: Справ.: в 4 т. – Т 2. / под общ. ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, – 1986. – 592 с.

Поступила в редакцию 10.03.2016

Вибір раціональних параметрів містка облойного ривчака під час моделювання відкритого штампування

Розроблена методика моделювання процесу пластичної течії матеріалу під час об'ємного штампування з облоєм. Методика основана на проведенні повнофакторного чисельного експерименту. Враховані різні фактори, що впливають на результат штампування, а саме параметри заготовки, кути нахилу містка штампу. Показано, що повне врахування параметрів, що впливають, дозволяє вибрати раціональну геометрію облойного ривчаку. Доведено, що несиметричне витікання матеріалу до облою потребує несиметричної геометрії каналу містка облойного ривчаку. Сформульовані завдання подальших досліджень.

Ключові слова: об'ємне штампування, облой, канал містка, місток облойно-го ривчаку, моделювання, пластична течія.

Selection of the Rational Parameters of the Flash Land in Closed-Die Forging Simulation

Material plastic flow simulation method for bulk closed die forging with flash is developed. Method is based on full-factor numerical experiment. Different factors were taken into account which influence on result of forging. They are: initial stock parameters, draft angles of the flash land. It was shown that only complete consideration of all influencing parameters can allow to select rational geometry of the flash impression. It was proven that asymmetrical material flow to the gutter requires asymmetrical geometry of the die land gap of the flash impression. The tasks for further investigation were formulated.

Key words: bulk closed die forging, flash, flash land gap, die land of the flash impression, simulation, plastic flow.