

Выбор независимых предикторов и зависимых откликов при моделировании открытой штамповки

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт"*

Предложено использовать для моделирования течения при объемной штамповке с облоем параметры, которые критично влияют на заполнение ручья металлом заготовки. При этом учтены такие факторы, как соотношение объема и формы заготовки и рабочих ручьев штампа. Предложено определять сложность контура поковки с помощью удельных энергетических параметров, обеспечивающих заполнение данного ручья, а также первоначальное заполнение заготовкой ручья штампа, критически влияющее на вид течения материала заготовки. Учтены другие факторы, влияющие на результат штамповки, такие, как отсутствие дефектов, углы наклона мостика штампа и ширина мостика. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

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

Введение

В современных условиях для кузнечно-штамповочного производства существенное значение имеет снижение расхода материала заготовки для получения поковки, повышение качества продукта при отсутствии дефектов. Кроме того, необходимо принимать меры, позволяющие уменьшить износ штампа при получении поковок сложной формы, а именно удлиненной формы переменного сечения.

В обычной практике производство таких поковок требует применения многоручьевого штамповки, когда первоначальная форма заготовки постепенно приближается к конечной в нескольких ручьях.

Для мелкосерийного производства неприемлемо как применение закрытой штамповки из-за усложнения конструкции штампа и высоких удельных нагрузок на него, так и использование многоручьевого штамповки, которая требует повышения металлоемкости используемого инструмента. Существенно уменьшить капитальные затраты на подготовку производства позволило бы использование одноручьевого открытой штамповки, для чего необходимо проведение дополнительных исследований, так как открытая штамповка сопровождается предельно неравномерным и сложным разбросом параметров течения материала по сечениям штампуемой заготовки. Вследствие этого наблюдается большая неравномерность всех параметров и полученные результаты могут значительно отклоняться от от расчетных.

В данной работе предпринята попытка предложить новые факторы-предикторы, критически влияющие на результаты процесса открытой объемной штамповки.

Постановка задачи исследования

Отказ от изготовления поковки за несколько переходов вынуждает для обеспечения заполнения гравюры штампа использовать избыточные напуски и припуски на размеры поковки. В результате объем штампованной поковки на 20 % и более превышает определяемый соответствующими стандартами [1 - 4].

Штамповка деталей сложной формы переменного сечения сопровождается чрезмерным вытеканием металла заготовки в облой. Это связано с необходимостью гарантированно заполнить рабочие ручки штампа. Согласно справочной литературе [7] объем облоя можно определить как произведение средней площади его поперечного сечения на длину линии, проходящей через центры тяжести поперечных сечений облоя:

$$V = S \cdot P,$$

где S – площадь сечения облоя, который зависит от сложности поковки и площади облойной канавки, определяемой по справочным таблицам;

P – периметр поковки по линии разъема.

Кроме того, для тяжелых поковок объем облоя увеличивается на 20%. В результате рекомендованный объем облоя достигает 50% веса заготовки, а в случае сложной формы сечения поковки с высокими узкими ребрами может достигать 70% и более. В нашем случае при моделировании подобных процессов объем металла, вытекающего в облой, достигал 100 %.

При всех известных входных независимых факторов необходимо выполнение условия отсутствия дефектов. При большой деформации поковок существует два вида деформации [8, 9]: когда происходит измельчение зерен и деформация происходит внутри зерен и когда имеет место деформация по границам зерен и происходит взаимное перемещение зерен. В первом случае предел текучести увеличивается из-за торможения дислокаций на границах зерен [10].

Кроме того, известно, что при пониженных температурах разрушение заготовки происходит внутри зерна, и при повышенных температурах сплошность нарушается между зернами [11]. В дополнение к этому необходимо учитывать величину деформации, достижение которой 30...40% приводит к превалированию межзеренной деформации и возникновению дефектов несплошности [11]. Вывод – необходимо обеспечивать равномерный уровень деформации до 30%, чтобы получать наиболее качественную структуру материала поковки.

В работах [12, 13] отмечалось, что неоднородность деформации при штамповке и образование «мертвых зон» деформации увеличивается за счет трения, что приводит к разрушению заготовки. В итоге при увеличении деформации относительное перемещение зерен происходит в областях с увеличенными касательными напряжениями, где наблюдается анизотропия формы зерен, что тоже ведет к разрушению металла. В конце же процесса, когда зоны затрудненной деформации сближаются и вовлекаются в процесс деформации, последняя снова преимущественно происходит внутри зерен. В работе [14] отмечается, что целесообразно использовать степень деформации не более 30...50 % за один переход, что приводит к образованию мелкозернистой структуры с оптимальными свойствами.

На рис. 1 показан пример моделирования штамповки, приводящей к разрушению поковки. Как видно из картины течения, его неравномерность, а значит наличие знакопеременных напряжений, прежде всего приводит к разрушению. Причем, несмотря на первоначальную симметрию процесса, неравномерность течения образует вследствие несимметричности.

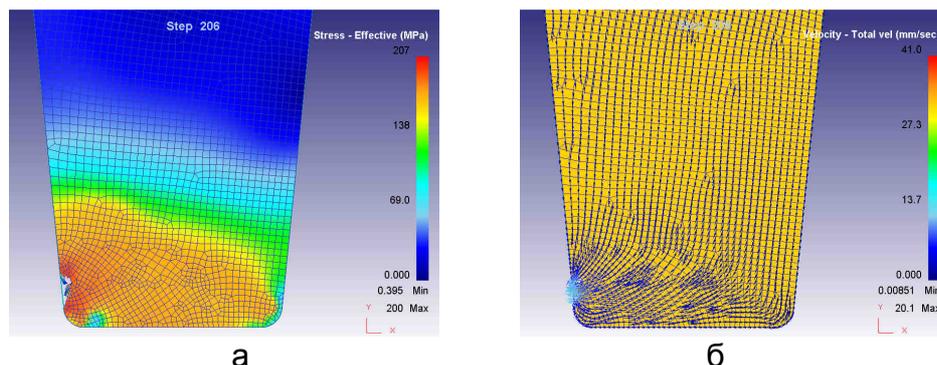


Рис. 1. Примеры моделирования разрушения для открытой объемной штамповки:
 а – распределение интенсивности напряжений и регистрация дефектов;
 б – распределение течения материала

Метод решения

Для определения влияния различных факторов на результат штамповки необходимо спланировать так называемый полнофакторный эксперимент.

По форме проведения и представления результатов эксперименты бывают качественными и количественными. Качественный эксперимент устанавливает сам факт наличия объекта, процесса или явления, но при этом не дает никаких количественных характеристик. Для открытой объемной штамповки это заполнение или незаполнение рабочих ручьев, оптимальное заполнение облойной канавки, наличие или отсутствие дефектов.

Количественный эксперимент не только фиксирует сам факт существования того или иного объекта, процесса или явления, но и позволяет установить соотношение между количественными характеристиками поведения исследуемого объекта и количественными характеристиками внешнего воздействия. В нашем случае внешнее воздействие понимается как величина необходимого усилия, величина заготовки (по отношению к объему ручьев), величина трения, геометрия облойной канавки (угол облойного мостика и его ширина).

Фактор – некоторая переменная величина, принимающая в каждый момент времени определенное значение из своей области определения и отражающая внешнее воздействие на объект или его отклик на это воздействие.

Уровень фактора – конкретное значение фактора из его области определения при экспериментальном исследовании объекта.

Выходные факторы в эксперименте еще называют откликом, а зависимость $Y_j = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$, которую пытаются установить, – функцией отклика. Выходной фактор характеризует реакцию (отклик) объекта на воздействие входного фактора. Выходные факторы в технологических процессах обработки металлов давлением – энергосиловые параметры процесса, величина износа инструмента, качество полученного продукта, качество обработанной поверхности и т. д.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) – это эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания всех уровней всех входных факторов (например, $N_2=2^k$, $N_3=3^k$). Условия полного факторного эксперимента записывают в виде таблицы – матрицы планирования эксперимента.

Независимо от числа факторов матрицы ПФЭ обладают следующими общими свойствами:

- симметричность относительно центра эксперимента – алгебраическая сумма элементов вектора-столбца каждого фактора равна нулю;
- условие нормировки – сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов;
- ортогональность – сумма почленных произведений любых двух вектор-столбцов матрицы равна нулю;
- рототабельность – точки в матрице планирования подбираются так, что точность предсказаний значений параметра оптимизации одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента и не зависит от направления.

Полный факторный эксперимент страдает избыточностью количества опытов. Если анализ априорной информации дает основания полагать, что в выбранной области эксперимента объект описывается линейной моделью, то количество опытов можно минимизировать, сократив матрицу планирования эксперимента. Такой эксперимент называется дробным факторным экспериментом (ДФЭ). Уменьшение числа опытов позволяет снизить затраты времени, средств, материалов на проведение и обработку эксперимента.

Спланируем эксперимент, для чего выберем уровни факторов. На основе анализа задачи исследования и априорной информации об исследуемом объекте для каждого входного фактора выделяется область, в пределах которой он будет изменяться во время эксперимента.

Планирование эксперимента начинают с выбора нулевого уровня каждого входного фактора, в качестве которого может быть взята любая точка факторного пространства эксперимента. Для определения других уровней входных факторов вводится интервал варьирования каждого входного фактора. На интервал варьирования накладываются ограничения естественного характера снизу и сверху. Так, заполнение ручья не может быть больше 100 процентов, геометрия мостика и облойной канавки берется из рекомендованных справочной литературой диапазонов.

К интервалу варьирования входного фактора предъявляются следующие требования:

- он не может быть менее ошибки, с которой измеряется данный фактор, иначе уровни фактора будут неразличимыми;
- он не может быть слишком большим, т. е. нижние и верхние уровни не должны покидать области определения фактора и области проведения эксперимента.

В случае открытой объемной штамповки входными факторами предлагаются: 1) относительная величина нижнего и верхнего ручьев, геометрия заготовки и ручьев; 2) относительное первоначальное заполнение ручья заготовкой (ее форма), 3) ширина мостика, 4) угол мостика. Толщину облоя на мостике (высоту мостика) примем согласно справочной литературе и считаем, что данный параметр больше влияет на самый конец доштамповки, т.е. оформление мелких радиусов. Кроме того, значимыми факторами будут свойства материала (при его нагреве), условия трения.

Определим интервалы варьирования входных факторов

Таблица 1

Входные факторы и интервалы их варьирования

Входные факторы	Отношение объемов ручьев	Первоначальное заполнение ручья (форма заготовки)	Ширина мостика, мм	Угол мостика
Интервалы варьирования	0,25...4	0,1...1	4...15	0...15

Выбираем при планировании эксперимента количество уровней по всем входным факторам одинаковым. Тогда количество опытов в эксперименте ($N_{\text{э}}$) может быть определено по формуле

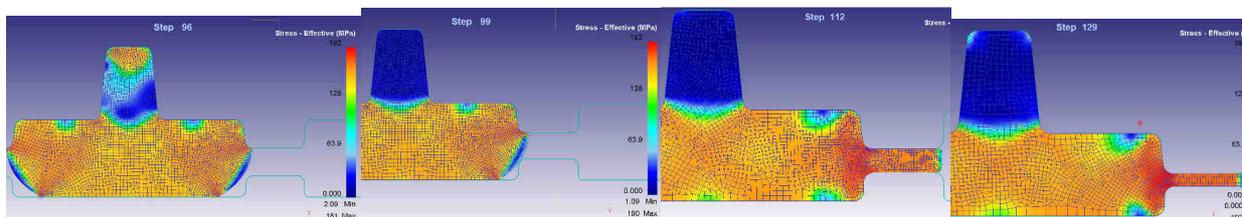
$$N_{\text{э}} = p_{\text{э}}^{k_{\text{э}}}, \quad (3.4)$$

где $p_{\text{э}}$ – число уровней каждого входного фактора;

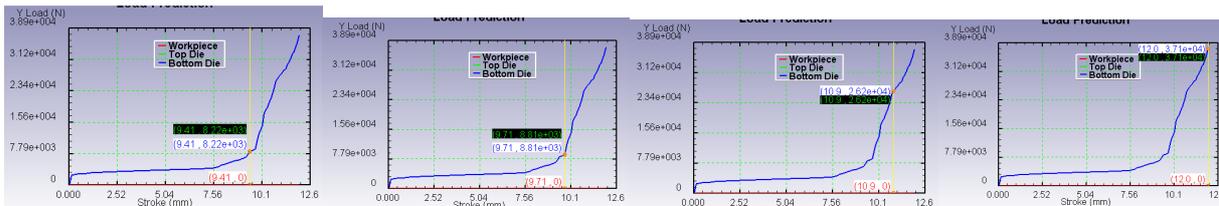
$k_{\text{э}}$ – число входных факторов, исследуемых в эксперименте.

При количестве уровней эксперимента 3 число необходимых экспериментов $3^4=81$. Кроме того, вместо отношений объемов ручьев и формы заготовки предлагается ввести параметр удельного сопротивления заполнения ручьев, которое зависит как от формы, объема ручьев, так и от формы и объема заготовки. Но данный параметр необходимо определить с помощью дополнительной серии экспериментов, например путем определения усилия, необходимого для заполнения подобного ручья материалом подобной же заготовки при закрытой штамповке.

В случае производства удлиненных поковок сложной формы поперечные сечения таких деталей предельно отличаются друг от друга как глубиной, так и шириной. Несомненно, логично ввести какие-либо относительные параметры ручья, определяющие силовые энергетические параметры, необходимые для заполнения гравюры штампа. Эти параметры можно использовать для определения последовательности заполнения штампа. Такая последовательность должна обеспечивать следующую очередность: сперва происходит осадка и заполнение более широкого и мелкого ручья и, прежде всего, того ручья, чей объем первоначально заполнен материалом заготовки, затем материал заготовки начинает вытекать в зазор мостика штампа, на третьем этапе происходит полное заполнение материалом заготовки всей гравюры штампа, после чего на четвертом этапе происходит доштамповка поковки по высоте, что обеспечивается полным выдавливанием излишка материала в облой. Подобная последовательность обеспечивается применением обычного мостика с параллельными поверхностями, что показано на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Очередность течения при открытой штамповке: а – последовательность этапов штамповки; б – соответствующий этап изменения усилия

Возникает вопрос: «Какие геометрические параметры ручья могут наиболее обобщенно определить энергетически-силовые параметры, необходимые для его заполнения?». В справочной литературе данный факт описывается с помощью диаграммы Ребельского, в которой необходимость применения заготовительного, подкатного открытого и подкатного закрытого ручьев определяется с помощью зависимости максимального и минимального диаметра, а также в зависимости от массы заготовки. Предлагаются также другие параметры, такие, как степень сложности поковки. В литературе [7] степень сложности понимается как отношение объемов поковки к объему простой геометрической фигуры, в которую вписывается форма поковки. Такой фигурой может быть шар, призма, цилиндр, и всего вводится четыре класса степеней сложности поковок

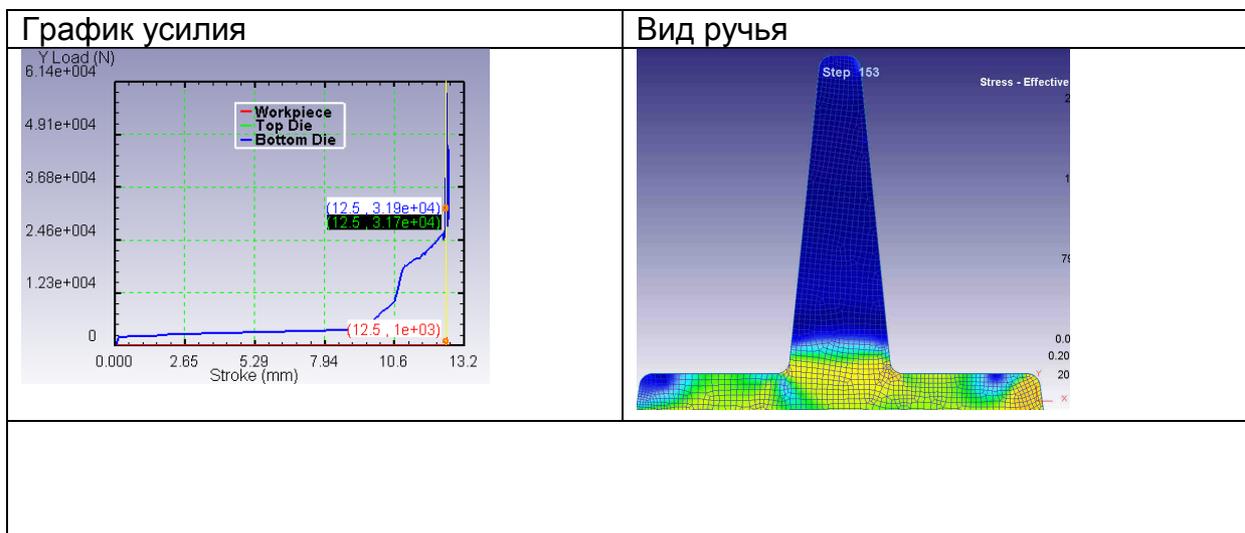
Степеням сложности поковок соответствуют следующие численные значения отношения $G_p G_f (V_p V_f)$:

C1 – св. 0,63 , C2 – св. 0,32 до 0,63 , C3 – св. 0,16 до 0,32 , C3 – до 0,16

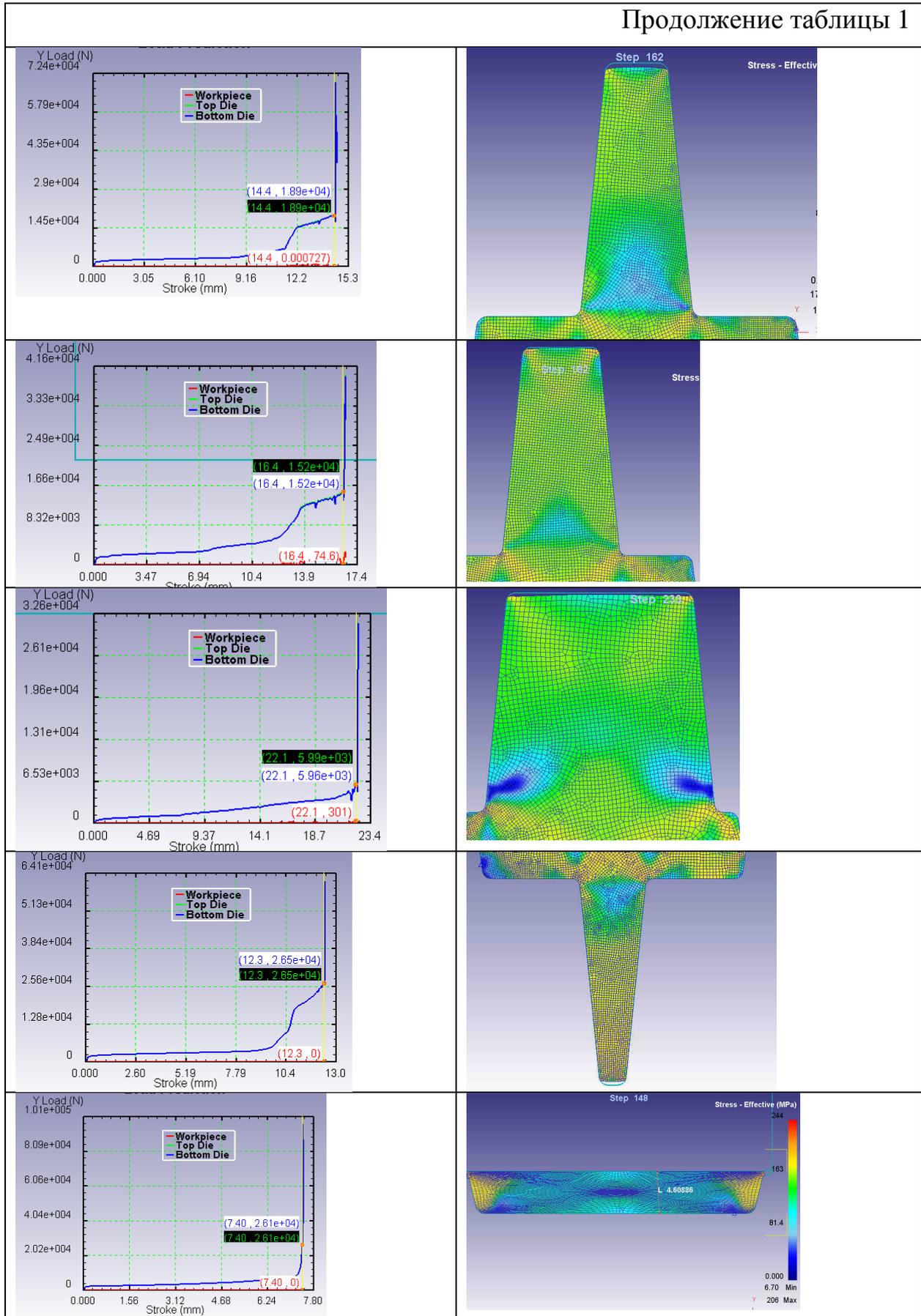
В нашей работе предлагается применять более объективный критерий, когда учитывается не простое соотношение одного размера поперечного сечения участков поковки, а более общий критерий, а именно удельное сопротивление заполнению гравюры штампа.

Таблица 1

Относительное сопротивление заполнению ручья



Продолжение таблицы 1



Как можно видеть из приведенных примеров, расположение ручьев в нижней половине штампа приводит к уменьшению потребного усилия, что объясняется тем, что заготовка уже занимает некоторую часть ручья.

На основании проведенных конечно-элементных моделирований штамповки в различных конфигурациях ручья и вычислений, в ходе которых были сопоставлены соотношения глубины и ширины ручьев с необходимым удельным давлением, была получена соответствующая диаграмма, которая позволяет на основе единого параметра оценить сложность заполнения самых различных ручьев (рис. 3). Удельное давление находили как соотношение усилия штамповки в самом конце заполнения ручья и площади поперечного сечения последнего.



Рис. 3. Зависимость удельного усилия заполнения ручья от соотношения его глубины и поперечного размера

Как видно, наиболее высокие удельные давления необходимы для относительно узких и мелких ручьев, когда наблюдается большое взаимное влияние зон заторможенной деформации.

Выводы

1. Для моделирования открытой объемной штамповки необходимо учитывать удельное сопротивление, создаваемое конкретной формой рабочего ручья.
2. Для моделирования течения необходимо учитывать взаимное расположение и относительную форму заготовки и рабочего ручья.
3. Наиболее критичным выходным откликом является фактор износа штампа. Данный фактор можно моделировать только в 3D-постановке

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. ОСТ 92 – 1133 – 72. Назначение и обеспечение ориентировки волокон в типовых штамповках из алюминиево – магниевых сплавов.
2. ОСТ 92 – 1619 – 87. Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки.
3. ОСТ 1.41188 – 78. Заготовки штампованные. Конструктивные элементы.

4. ОСТ 3980–76. Штампы на молоты, прессы, горизонтально – ковочные машины. Расчёт и конструирование.
5. ОСТ 92 – 9693 – 91. Детали, изготавливаемые методом горячей объёмной штамповки. Общие требования технологичности конструкции.
6. ОСТ 92 – 1008 – 77. Штамповки и поковки из алюминиевых сплавов. Технические требования.
7. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. –Т. 2. [Текст] / под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.
8. Мурзов, А. И. Алюминиевые и специальные сплавы. / А. И. Мурзов, В. Г. Позднеев Расчёт нестационарных температур при осадке // Труды ВИАМ. – М, ОНТИ, 1968. –С. 218 – 225.
9. О некоторых закономерностях развития пластической деформации при горячей деформации высоких заготовок / Ю. Н. Куренков, Г. Г. Москвичёв и др. Алюминиевые сплавы и специальные материалы // Труды ВИАМ. –Вып. 9. –М.; ОНТИ, 1975, –300 с.
10. Колбасников, Н. Г. Физические основы прочности и пластичности металлов 2004.PDF
11. Мурзов, А. И. Механизм и условия образования несплошностей при пластическом формоизменении алюминиевых сплавов / А. И. Мурзов, В. Г. Позднеев // Труды ВИАМ. –Вып. 9. –М., ОНТИ, 1975, –С. 118 – 125.
12. Исаченков, Е. И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е. И. Исаченков. –М.; Машиностроение, 1978, –208 с.
13. Дзугутов, М. Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением». М. Я. Дзугутов. Издание второе. –М.; Металлургия, 1974, –280 с.
14. Галкин, В. И. Повышение качества штампованных поковок типа «фланец» из алюминиево – магниевых сплавов с использованием одноручьевого штамповки в открытых и закрытых штампах / В. И. Галкин, П. А. Головкин. Электронный ресурс <http://lib.convdocs.org/docs/index-237900.html>

Поступила в редакцию 29.05.2018

Вибір незалежних предикторів і залежних відгуків при моделюванні відкритого штампування

Запропоновано використовувати для моделювання течії при об'ємному штампуванні з об'ємом параметри, які критично впливають на заповнення ривчака металом заготовки. При цьому враховані такі фактори, як співвідношення обсягу і форми заготовки й робочих ривчаків ітампа. Запропоновано визначати складність контуру поковки за допомогою питомих енергетичних параметрів, що забезпечують заповнення даного ривчака, а також початкове заповнення заготовкою ривчака штампа, критично впливає на вид течії матеріалу заготовки. Розглянуті інші фактори, що впливають на результат штампування, такі, як відсутність дефектів, кути нахилу містка штампу й ширина містка. Сформульовано завдання подальших досліджень.

Ключові слова: об'ємне штампування, облой, канал містка, місток облойної канавки, моделювання, пластична течія

Selection of Independent Predictor and Dependent Response for Closed Die Forging with Flash

It was proposed to apply critical parameters for filling the impression of the die for flow modeling at closed die forging. At the same time such factors as ration of the volume and the shape of the workpiece and working impressions in the die. The complexity of the forging shape is proposed to take into account with the help of the specific energy parameters, which provide filling of the impression and preliminary filling of the impression by the workpiece and critically influences flow of material. Other factors are considered also which influence on result of the forging like absence of defects, angle of the die land and its width. The further tusks are formulated.

Key words: close die forging, flash, flash land clearance, flash land, modeling, plastic flaw.

Сведения об авторах:

Борисевич Володимир Володимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: @khai.edu.

Мохсен Закизаде Байгара – соискатель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Застела Александр Николаевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.