талей из листа эластичной средой в жесткой матрице за счет обеспечения стабильности протекания процесса, улучшения качества получаемых изделий и сокращения процента брака. На основе предложенного способа разработана промышленная технология изготовления деталей интерьера самолета ИЛ-96М.

Список литературы

1. *Исаченков Е. И.* Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение. 1967. 367 с.

2. *Попов С. П., Томилов М. Ф., Томилов Ф. Х.* Формообразование деталей из листа с применением эластичных сред. Воронеж: Научная книга. 2007. 185 с.

3. *Пат.* 2223835 РФ, МПК B 21 D 22/10. Способ многопереходной вытяжки эластичной средой // М. Ф. Томилов, Ф. Х. Томилов, С. П. Попов; опубл. 20.02.2004. Бюл. № 3.

4. *Шагунов А. В., Шереметов В. Е., Томилов М. Ф.* Разработка технологии вытяжки эластичной средой деталей из листа // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 3. С. 20—23.

УДК 621.778.01

Ю. Н. ЛОГИНОВ, д-р техн. наук; А. Е. ПЕРВУХИН (Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург); Н. А. БАБАЙЛОВ, канд. техн. наук (Институт машиноведения Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург)
E-mail: j.n.loginov@urfu.ru

Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения

Выполнено сравнение формы очага деформации, применяемой для описания процесса волочения в аналитической постановке и полученной при решении задачи методом конечных элементов. Для решения задачи применен программный модуль РАПИД-2D, разработанный в Уральском федеральном университете. Формы очага деформации описаны с помощью полей скоростей деформации. Выявлено, что формы имеют отличия, которые зависят от номера прохода волочения. После достижения определенного уровня нагартовки вместо одного максимума скоростей деформации, расположенного на оси волочения, могут появляться два максимума, смещенные относительно оси волочения. Предложено учитывать этот факт для оценки опасности появления макропор в заготовке.

Compare of the form of the deformation zone, used to describe the drawing process in a research setting and obtained by solving the problem of the finite element method is satisfied. A software module RAPID-2D, developed in the Ural Federal University, applied to solve the problem. Forms of deformation zone described by the strain rate fields. It was revealed that the zone forms have differences, which depend on the number of drawing passes. After reaching a certain level of work hardening instead of a single maximum rate of deformation, which is located on the axis of the drawing, two peaks are shifted with respect to the axis of drawing may appear. It proposed to take this into account for assessing the risk of the emergence of macro pores in the article.

Ключевые слова: волочение; макропора; пластическая деформация; метод конечных элементов; скорость деформации.

Keywords: drawing; macropore; plastic deformation; finite element method; strain rate.

Процесс волочения является обычно калибрующей операцией, с помощью которой достигается необходимая точность изготовления полуфабриката и повышенная чистота поверхности. В теории процессов обработки металлов давлением описанию формы очага деформации уделяется повышенное внимание, поскольку от этого зависит точность математических операций, например, интегрирования по объему показателей напряжений

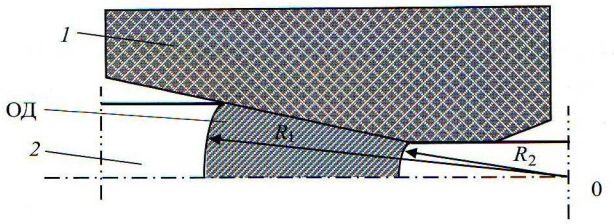


Рис. 1. Отображение границ очага деформации ОД (верхняя половина) при волочении дугами окружностей:
1 — волока; *2* — заготовка

и деформаций и, следовательно, определение внутренней энергии, а значит и в целом энергосиловых параметров, например, с целью их минимизации [1].

В базовых решениях задач из теории волочения принято представлять форму очага деформации в продольном сечении в виде сегмента, ограниченного дугами окружностей радиусами R_1 и R_2 (см. рис. 1).

Такой прием позволяет описать поле кинематически возможных скоростей в сферической системе, использующей радиус в качестве одной из координат [2].

Переход от аналитических решений задач к конечно-разностным решениям дает возможность оценить точность допущений, принятых в теории волочения.

Для оценки справедливости допущения о радиальной форме границы очага деформации при волочении осуществлена постановка задачи с применением расчетного модуля *РАПИД-2D*, разработанного в Уральском федеральном университете, для расчета процессов пластической деформации материалов, обладающих свойствами степенного и скоростного упрочнения (Copyright © Полищук Е. Г., Жиров Д. С., 2000—2004) [3]. Некоторые варианты расчетов представлены в работах [4, 5].

Для расчета принимают угол наклона образующей волоки $\alpha = 10°$. Использован реальный маршрут волочения (диаметры) одного из производств медной проволоки следующего вида: 8 → 6,53 → 5,37 → 4,48 → 3,76 мм. В соответствии с ним рассчитаны коэффициенты вытяжки:

$$\lambda_i - d_{i-1}^2 / d_i^2,$$

где d_i — текущий диаметр в i-том проходе.

Одновременно подсчитывают накопленные коэффициент вытяжки и относительное обжатие по площади к данному проходу вытяжки следующим образом (см. рис. 2):

$$\lambda_{\Sigma i} = \prod \lambda_i; \quad \varepsilon_{\Sigma i} = 100 \cdot \frac{\lambda_{\Sigma i} - 1}{\lambda_{\Sigma i}}. \qquad (1)$$

Как видно из рисунка, коэффициент вытяжки по проходам снижается на небольшую величину, а накопленное относительное обжатие по проходам составляет 78 %. В ходе решения задачи по проходам волочения учитывается характер нагартовки заготовки в предыдущих проходах волочения. Для этого рассчитывают напряженно-деформированное состояние в первом проходе волочения, определяют распределение деформации по объему заготовки, заготовку с унаследованной неравномерностью деформации «переносят» в следующий этап расчета с другой конфигурацией волочильного инструмента, характерной для второго прохода волочения, вновь производят расчет и т. д.

Деформированное состояние при известных компонентах тензора скорости ξ_{ij} описывается интенсивностью скоростей деформации сдвига H и скоростью деформации ξ, определяемыми формулами [6]:

$$H = \sqrt{2\xi_{ij}\xi_{ij}}, \quad \xi = H/\sqrt{3}, \qquad (2)$$

а также степенью деформации сдвига

$$\Lambda = \int_0^i H d\tau, \qquad (3)$$

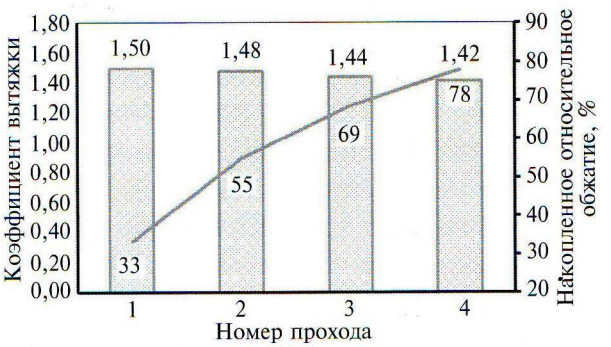


Рис. 2. Коэффициенты вытяжки и накопленное относительное обжатие по проходам волочения

рассчитываемой вдоль траектории движения частицы по очагу деформации в течение времени t.

Инструмент для деформации — волока, изготовленная из искусственного алмаза, в решении задачи представлена как абсолютно жесткое тело. Кинематические граничные условия для пластического тела заданы перемещениями переднего торца заготовки, а для инструмента — фиксированием положения волоки в волокодержателе. Взаимодействие деформируемого материала и инструмента задано с применением закона трения по Зибелю при показателе трения 0,1 и использованием условия равенства нулю нормальных составляющих перемещения на контактной границе. Свойства материала заданы в табличном виде, как зависимость сопротивления деформации или напряжения пластического течения технически чистой меди от степени и скорости деформации (нелинейно упрочняемая среда) [7].

При решении задачи учитывается не только степенное, но и скоростное упрочнение. Предполагается, что волочение ведется на многопроходном стане, для которого выполняется постоянство секундных объемов, поэтому линейные скорости нарастают пропорционально коэффициентам вытяжки. Для входа в первую по ходу маршрута волоку линейная скорость составляет 1,3 м/с.

Если целью исследования является изучение формы очага деформации, то наиболее корректно его границы описываются полем скоростей деформации. Это поле для четырех проходов волочения представлено на рис. 3 (см. 2-ю полосу обложки).

В отличие от аналитического решения краевой задачи в первом и втором проходах волочения (см. рис. 3, *а*, *б*) форма правой границы близка к радиальной, а левая граница не только невыпуклая относительно центра кривизны 0 на рис. 1, но имеет обратную кривизну. В третьем и четвертом проходах волочения (см. рис. 3, *в*, *г*) ни правая, ни левая границы не имеют радиальных очертаний, а состоят из чередующихся участков выпуклости и вогнутости.

Таким образом, радиальное строение очага деформации, принятое за основу при построении кинематически возможных скоростей, реализуется, и то частично, только для первого прохода волочения. В последующих проходах это условие нарушается.

Для сравнения полученных результатов с аналитическим подходом определяется средняя по очагу деформации скорость деформации $\xi_{ср}$ и средняя интенсивность скорости деформации сдвига $H_{ср}$ по формулам:

$$\xi_{ср} = \frac{6\ln\lambda_i \operatorname{tg}\alpha}{(\lambda_i\sqrt{\lambda_i}-1)d_i} v_{1i}, \quad H_{ср} = \sqrt{3}\,\xi_{ср}, \qquad (4)$$

где v_{1i} — линейная скорость выхода проволоки из волоки в i-том проходе.

На рис. 4 показаны средние и максимальные значения H, определенные по рис. 3. Гистограмма показывает, что средние значения параметра ниже максимальных, при этом их разница уменьшается по проходам, что говорит о сближении величин, т. е. деформация по мере обжатия заготовки становится менее локализованной. Действительно видно, что область высоких скоростей деформации занимает в первом проходе малую площадь (см. рис. 4). В следующих проходах эта площадь увеличивается.

Кроме того, к четвертому проходу волочения вместо одного максимума величины H появляются два максимума. Это можно объяснить различной интенсивностью изменения сопротивления деформации σ_S по мере нагартовки со степенью деформации ε (см. рис. 5).

В соответствии с изображенной кривой в первом проходе волочения градиент сопро-



Рис. 4. Интенсивность скорости деформации сдвига по проходам: средняя (горизонтальная штриховка) и максимальная (вертикальная штриховка)

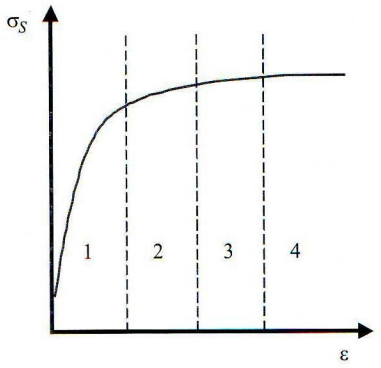


Рис. 5. Стилизованная кривая упрочнения металла с разделением на зоны по проходам волочения 1—4

тивления деформации относительно степени деформации оказывается большим. Поэтому в участках металла, сильно подверженных деформации, происходит резкое повышение прочностных свойств, и, в соответствии с принципом наименьшего сопротивления, пластическое течение переходит в соседнюю область, чем уменьшается общий уровень неравномерности деформации.

Однако при малой интенсивности упрочнения описанный выше эффект не проявляется, чем провоцируется локализация деформации в областях с повышенным уровнем эквивалентных напряжений.

Разделение очага деформации на зоны с двумя максимумами опасно появлением макропор, которые способствуют повышенной обрывности проволоки [8, 9]. Специально выполненные исследования показывают, что могут существовать такие чередования обжатий и углов наклона образующей волоки, при которых условия для образования макропор оказываются наименее выгодными. Например, экспериментально установлено, что в первом проходе волочения целесообразно применять большие обжатия и малые углы волоки, а в следующем проходе — малые обжатия и большие углы волоки [10]. Вместе с тем, такие решения не являются достаточно универсальными, поскольку они зависят от вида кривой упрочнения, а также от степени текстурованности материала [11].

Практическая ценность выполненного исследования заключается в установлении факта возможного появления двух максимумов распределения скоростей деформации уже к четвертому проходу многократного волочения, что приводит к риску появления макропор и последующей повышенной обрывности. При этом обрывность может не проявляться сразу же после возникновения макропоры, а по мере накопления дефектности обрыв может наступить через несколько проходов или даже после перехода от режима грубого волочения к среднему, тонкому или тончайшему волочению.

Вывод. С применением метода конечных элементов выявлены различия в форме очага деформации по проходам многократного волочения. В отличие от гипотезы радиального строения, применяемой в теории волочения, форма очага претерпевает изменения по проходам волочения, приобретая выпукло-вогнутую конфигурацию. Выявлено, что в первых проходах волочения наблюдается один максимум скорости деформации, расположенный на оси заготовки. К четвертому проходу в очаге деформации могут наблюдаться два максимума, что говорит о возможности зарождения макропор. Указанное явление объяснено с позиции изменения интенсивности упрочнения металла по проходам.

Список литературы

1. *Буркин С. П., Коршунов Е. А., Шахпазов Е. Х., Смирнов В. К., Бабайлов Н. А., Логинов Ю. Н.* Минимизация потребляемой мощности при производстве стального проката на литейно-деформационных модулях. Сталь. 1996. № 6. С. 29—33.

2. *Перлин И. Л., Ерманок М. З.* Теория волочения. М.: Металлургия. 1971. 448 с.

3. *Полищук Е. Г., Жиров Д. С., Вайсбурд Р. А.* Система расчета пластического деформирования РАПИД / Кузнечно-штамповочное производство. 1997. № 8. С. 16—19.

4. *Логинов Ю. Н., Котов В. В.* Метод конечных элементов в описании напряженно деформированного состояния процесса прессования. Екатеринбург. 2010. 320 с.

5. *Логинов Ю. Н.* Решения технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования «РАПИД 2D». Учебно-методическое пособие / Екатеринбург. 2007. 78 с.

6. *Логинов Ю. Н.* Медь и деформируемые медные сплавы. Уч. пособ. Екатеринбург. УГТУ. 2006. 136 с.

7. *Chevalier L.* Prediction of defects in metal forming: application to wire drawing. Journal of Materials Processing Technology. 1992. V. 32. Pp. 145—153.

8. *Колмогоров В. Л.* Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1986. 689 с.

9. *Логинов Ю. Н.* Влияние угла рабочей зоны волоки на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди. Цветные металлы. 2010. № 3. С. 94—97.

10. *McAllen P. J., Phelan Pat.* Numerical analysis of axisymmetric wire drawing by means of a coupled damage model Journal of Materials Processing Technology. 2007. V. 183. Pp. 210—218.

11. *Логинов Ю. Н., Демаков С. Л., Илларионов А. Г., Карабаналов М. С.* Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Деформация и разрушение материалов. 2011. № 5. С. 38—44.

ИНСТРУМЕНТ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

УДК 621.073.073:331.101.6

А. М. БУРОВ, канд. техн. наук (Волгоградский государственный строительный университет, г. Волгоград); И. А. БАРАНОВ (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
E-mail: 20burov15@mail.ru

Влияние конструкции штампа на производительность технологического процесса

Рассмотрены технологические особенности деформирования пористых заготовок в закрытых штампах и их влияние на стоимость и производительность штамповой оснастки. Проведен анализ причин низкой производительности горячей штамповки в закрытых штампах. Предложена технологическая схема, показывающая особенность положения формообразующего инструмента на характерных стадиях цикла горячей штамповки и позволяющая свести к минимуму вышеуказанные ограничения. На ее основе разработан штамп для горячей штамповки порошковых поковок сложной формы. Предложенная конструкция штампа для горячей штамповки, разработанная в соответствии с представленной технологической операционной схемой, позволяет уменьшить быстродействие процесса до 10...15 сек, что соответствует повышению производительности до 4...6 шт./мин.

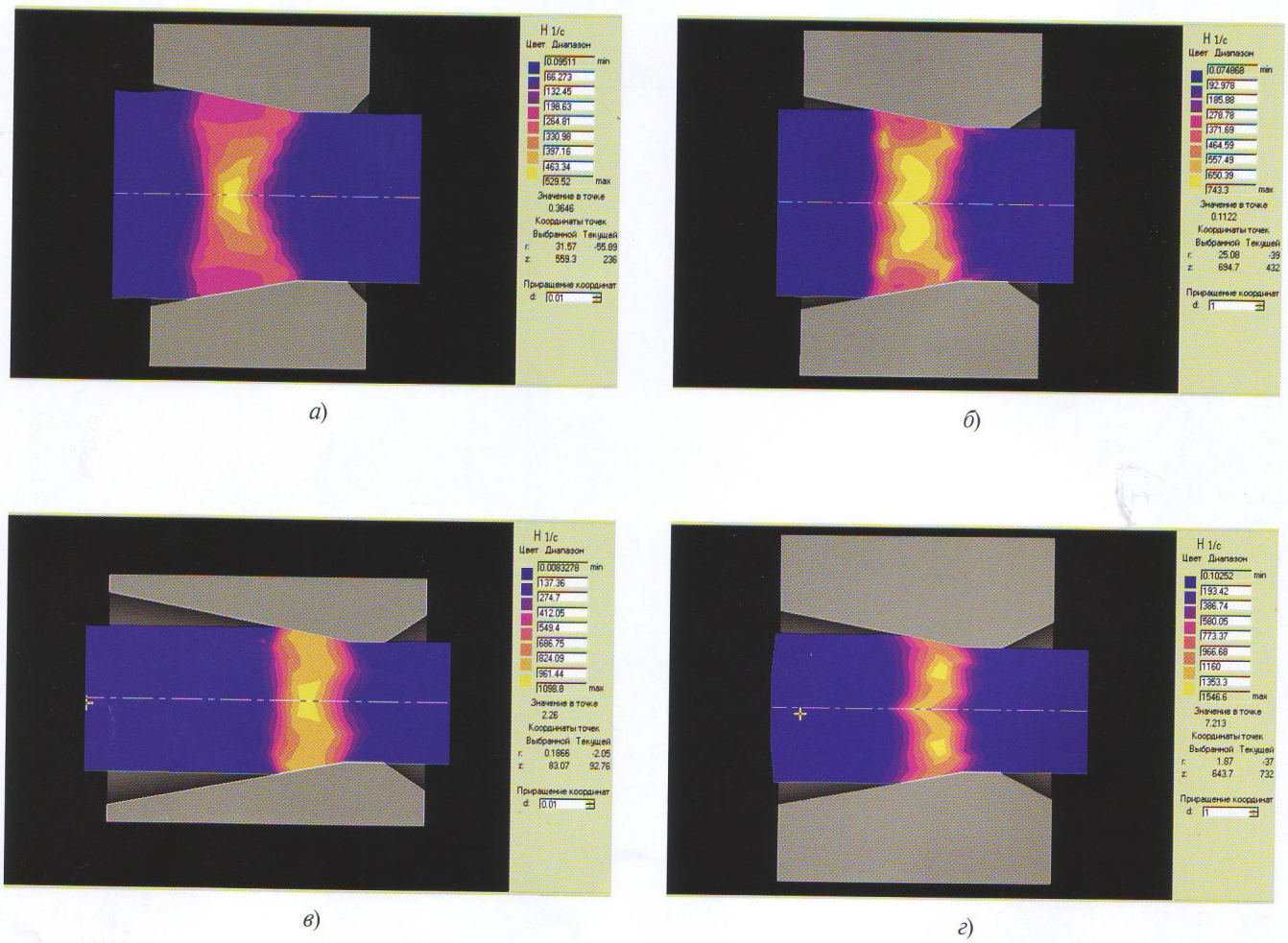
Technological features of deformation of porous blanks in closed dies and their impact on the cost and performance of die tooling are shown in the article. The analysis of reasons of low productivity during hot forging in closed dies is presented. There is described the proposed technological scheme showing the feature position of the forming tool on the characteristic stages of the cycle of hot forging and allowing to minimize the above limitations. On its basis it is developed a stamp for hot forging of powder forgings of complex shape. This stamp is designed in accordance with the presented technological scheme operating to reduce the speed of the process to 10...15 sec, which corresponds to the increased productivity of up to 4...6 PCs/min.

Ключевые слова: порошковая заготовка; горячая штамповка; штамп для прессования и штамповки.

Keywords: powder; hot forging; stamp for pressing and stamping.

Технология горячей штамповки порошковых заготовок (ГШПЗ), в основе которой лежат следующие операции: приготовление шихты, прессование пористой порошковой заготовки, нагрев (спекание), горячая штамповка, характеризуется тем, что формоизменяющие операции холодного прессования и горячей штамповки осуществляются в закры-

«Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения»



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 3. **Поле интенсивности скорости деформации сдвига *H* от первого к четвертому проходам:** *а, б, в, г* – первый, второй, третий и четвертый переходы соответственно