



The deformed state of the forging was investigated in this work. For its exact specifying the «stepwise deformation method» was used.

С. А. МАШЕКОВ, Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева,
Н. Т. СМАЙЛОВА, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
А. Е. НУРТАЗАЕВ, Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева

УДК 621.73

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОТЯЖКЕ В ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ БОЙКАХ

Разработка технологических режимов деформирования, обеспечивающих получение металлоизделий с предельно высокими для конкретного сплава технологическими и эксплуатационными свойствами, связана с определением степени влияния технологических параметров деформирования на величину и распределение степени деформации сдвига [1].

Успешное решение этой задачи прежде всего зависит от точности определения компонентов тензора деформаций вдоль траектории движения материальной точки теоретическим или экспериментальным методом.

Известно, что достоверность результатов теоретических исследований подтверждается обоснованным использованием фундаментальных зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задачи математического моделирования, применением современных математических методов и средств вычислительной техники [1].

В настоящее время для решения объемных задач обработки металлов широко используется метод конечных элементов (МКЭ). При этом современное развитие информационных технологий и стремительный рост вычислительных ресурсов персональных компьютеров (ПК) сделали МКЭ наиболее эффективным методом решения технологических задач ОМД. В настоящее время широкому кругу пользователей ПК доступны ориентированные версии мощных программных комплексов МКЭ-анализа такие, как ANSYS, ALGOR, NASTRAN, I-DEAS, SUPERFORM, DEFORM и т.п.

При качественном и количественном совпадении теоретических результатов с данными экспериментальных исследований, проведенных в ши-

роком диапазоне изменений технологических режимов исследуемого процесса, доказываются достоверность полученных результатов. Для более полного доказательства достоверности полученных нами результатов с использованием программного комплекса MSC.SuperForge [2] были проведены эксперименты в лабораторных условиях.

В настоящей работе исследовано деформированное состояниековки, т.е. нестационарного процесса. Для точного определения деформированного состояния использован «метод этапного деформирования», т.е. деформацию дробили на малые ступени k таким образом, чтобы на каждой из них применялся аппарат теории течения в приращениях деформаций [1]. Это дает возможность получать информацию для следующих друг за другом стадий деформирования или двух актуальных состояний. При этом предшествующее актуальное состояние необходимо принимать за начальное, а последующее – за деформированное, причем приращение компонентов тензора деформации $\Delta \varepsilon_{ij}^k$ за промежуток времени Δt^k , отделяющий два актуальных состояния, является бесконечно малым. Таким образом, для «метода этапного деформирования» необходимо наносить новую координатную сетку на предварительно деформированный образец или для каждой стадии деформирования использовать новый исходный образец. Дальнейшее использование такого образца возможно только в рамках малых приращений деформаций относительно актуального состояния, принятого в начале эксперимента за начальное.

Преимущество «метода этапного деформирования» состоит в том, что фиксируются большие деформации для всей последовательности акту-

альных состояний. Так как деформации между рассматриваемыми обжатиями малы, то можно считать, что различия между лагранжевыми и эйлериными координатами несут существенны, т. е. результаты частного и полного дифференцирования совпадают. При этом тензор деформации и скорости деформации на каждой k -й ступени можно определить по формулам [1]:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^k = (\Delta U_{ij}^k + \Delta U_{ji}^k) / 2, \quad \xi_{ij}^k = \Delta \varepsilon_{ij}^k / \Delta t^k, \quad (1)$$

где ΔU_{ij}^k – перемещения узловых точек на каждой k -й ступени деформирования.

Так как в настоящей работе рассматриваются следующие друг за другом бесконечно малые стадии деформирования, то время, необходимое для каждой стадии деформирования, можно преобразовать к виду [1]:

$$\Delta t^k = \Delta \varepsilon H_0 / V_0, \quad (2)$$

где H_0 – исходная высота поковки перед очередным этапом деформирования; V_0 – скорость инструмента; $\Delta \varepsilon$ – единичное обжатие на каждой стадии деформирования.

На основании сказанного выше можно считать, что величина Δt^k играет роль параметра $T_{\Delta \varepsilon}^k = \Delta t^k T_{\xi}^k$, $\Delta \varepsilon_{ij}^k = \xi_{ij}^k \Delta t^k$ [1]. Следовательно, приращение степени деформации сдвига некоторой частицы за время Δt^k можно представить в виде [1]:

$$\Delta \Lambda = \Delta t^k \sqrt{2 \xi_{ij}^k \xi_{ji}^k} = \Delta t^k H, \quad (3)$$

где H – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Для возможности исследования объемного течения металла при протяжке поволоков типа пластин в бойках с различной формой была предложена опытная схема деформирования. По данной схеме протяжку начинают с центральной части заготовки, что позволяет деформировать без деплантации плоскость симметрии XOY в продольном сечении. Это дает возможность использовать широко распространенный в процессах обработки металлов давлением (ОМД) метод координатных сеток для исследования деформированного состояния.

Многочисленные опыты показали, что из-за малости величин обжатий прямые линии в плоскости XOY остаются прямыми и после деформации. Поэтому нахождение координат любой материальной точки в плоскости XOY после каждого единичного обжатия необходимо производить, используя простые геометрические и арифметические действия. Для достоверности полученной картины деформирования и соизмеримости точности резуль-

татов при определении полей перемещения в плоскости XOY следует найти перемещения для точек, составляющих исходную координатную сетку с выбранным ранее для проводимого эксперимента шагом.

Начальные координаты узловых точек прямоугольной решетки, нанесенной в плоскостях симметрии, обозначим через X_{oij} , Y_{oij} , а координаты материальной точки после каждого этапа деформирования – через X_{ij} , Y_{ij} . Тогда перемещение определится как:

$$\begin{cases} U_{xij} = X_{ij} - X_{oij}, \\ U_{yij} = Y_{ij} - Y_{oij}. \end{cases} \quad (4)$$

Определение поля перемещения в третьем направлении, перпендикулярном плоскости XOY , вытекает из условия постоянства объема, из которого следует, что перемещение по нормали можно рассчитать по относительному изменению площади ячейки при переходе ее из положения $N-1$ в N -е. На основе этого условия следует найти координаты материальных точек в направлении оси Z , при этом из-за малости обжатия принято, что куб размером $5 \times 5 \times 5$ превращается в параллелепипед с соответствующими в результате деформации размерами.

На основе простых алгебраических соотношений для четырехугольной сетки (ячейки) $ABCD$ возможно определить размеры ячейки и его площадь следующим образом:

$$\Delta x_{ij} = x_{Aij} - x_{Bij}, \quad \Delta y_{ij} = y_{Aij} - y_{Bij}, \quad S_{ij} = \Delta x_{ij} \Delta y_{ij}.$$

Относительное перемещение z_{ij} рассчитывается из условия постоянства объема: $z_{ij} = V_{oij} / S_{ij}$. Тогда перемещение в направлении оси Z равно:

$$U_{z_{ij}} = z_{ij} - z_{oij}. \quad (5)$$

После расчета размеров каждой рядом стоящей ячейки координаты стыкующихся точек необходимо просуммировать и разделить на их количество.

При обработке экспериментальных данных часто возникает вопрос – включать в дальнейшую статистическую обработку результат, резко отличающийся от всех других результатов, или отбросить его, как грубую ошибку эксперимента. Для этого по известной методике необходимо проверить попадание «странного» результата в разряд грубых ошибок [3].

Анализ перемещений опытных точек позволил сделать вывод, что функции перемещений U_x , U_y и U_z могут быть достаточно хорошо аппроксимированы степенными рядами по координатам X , Y и Z следующим образом:

$$\begin{cases} U_x(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{m n k l} X^m Y^n Z^k e^l, \\ U_y(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{m n k l} X^m Y^n Z^k e^l, \\ U_z(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{m n k l} X^m Y^n Z^k e^l. \end{cases} \quad (6)$$

С помощью метода наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов отклонений измеренных значений U_x , U_y и U_z от расчетных функций, необходимо получить систему уравнений. Для оценки надежности вычислений аппроксимированных значений U_x^a , U_y^a и U_z^a нужно определить абсолютное отклонение ΔU_x , ΔU_y и ΔU_z этих величин от средних экспериментальных \bar{U}_x , \bar{U}_y и \bar{U}_z , а также их среднеквадратичное отклонение S_x , S_y и S_z от опытных значений.

Так как поля перемещений определяются по экспериментальным данным для симметричного поперечного сечения исследуемого технологического процесса, то точка деформированного тела за один шаг деформации получит приращение перемещений:

$$\begin{cases} \Delta U_{x_i} = U_{x_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}), \\ \Delta U_{y_i} = U_{y_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}), \\ \Delta U_{z_i} = U_{z_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{z_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}). \end{cases} \quad (7)$$

Используя полученные результаты, необходимо рассчитать приращение степени деформации сдвига по формуле (3) для объемного течения металла.

Описанную выше методику использовали для расчета степени деформации сдвига при предложенной нами протяжке заготовки в трапециевидных бойках [4]. Для проведения эксперимента из свинцово-сурьмянистого сплава были изготовлены 12 квадратных в сечении образцов размером $50 \times 50 \times 100$ мм и бойки трапециевидной формы. С целью исследования деформированного состояния образцы имели продольную плоскость разреза на оси симметрии образца. На поверхности среза механическим способом наносилась координатная сетка с шагом $h = 5$ мм, после чего две части образцов соединялись сплавом Вуда.

Производили оценку точности нанесения координатной сетки. При этом было принято, что отклонения от номинального (заданного) значения шага подчиняются нормальному закону распределения случайных ошибок. Расчеты показали, что отклонения среднего арифметического значения от

номинального составили $2,1 \cdot 10^{-2}$ мм. Доверительный интервал ошибок при вероятности 0,977 составил ± 10 мкм. Такие отклонения в нанесении сетки вполне допустимы для исследования средних деформаций от 3% и выше, что характерно для большинства процессов ОМД.

Последовательность проведения эксперимента с использованием метода координатных сеток следующая. Исходные образцы деформировали в трапециевидных бойках со скоростью деформирования $\dot{\vartheta} = 1,75$ мм/с и единичным обжатием $\Delta \varepsilon = 5\%$ до полного заполнения впадин инструмента металлом заготовки. При этом после каждого обжатия образцы разъединяли на две части (рис. 1, а, б, в) и измеряли деформированные координатные сетки на инструментальном микроскопе УИМ-23 с точностью $\pm 0,01$ мм. Эксперименты проводили 3 раза.

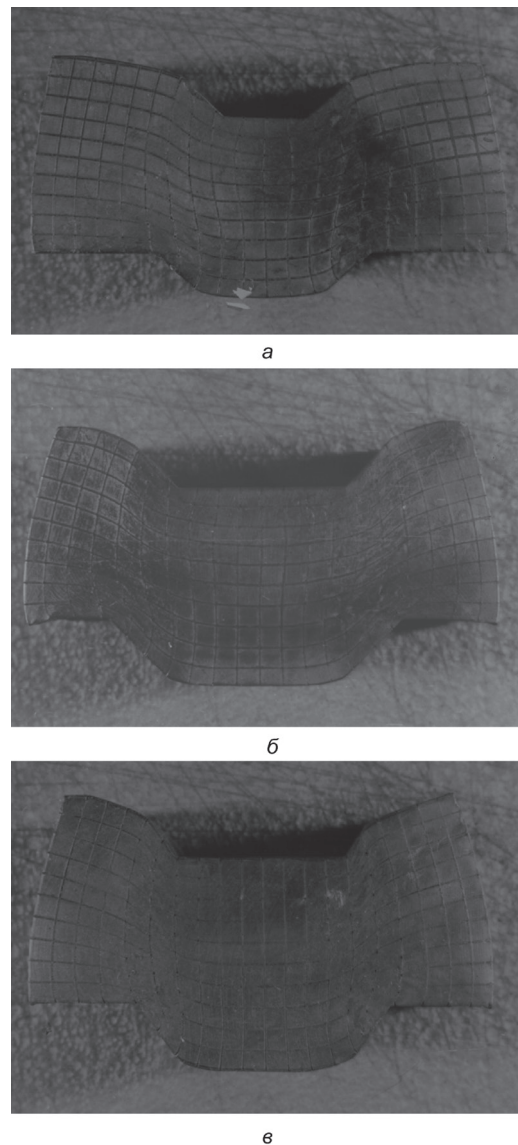


Рис. 1. Образцы, деформированные в трапециевидных бойках с углом наклона рабочей поверхности $\alpha = 35^\circ$: а – $m/n = 0,7$, б – $0,8$; в – $0,9$

Функции перемещений U_x , U_y и U_z аппроксимируются степенными полиномами. Для оценки надежности вычислений аппроксимированных значений U_x^a , U_y^a и U_z^a определили абсолютные отклонения ΔU_x , ΔU_y и ΔU_z этих величин от средних экспериментальных \bar{U}_x , \bar{U}_y и \bar{U}_z , а также их среднеквадратичные отклонения S_x , S_y и S_z от опытных значений. Их максимальные значения составили следующие величины: $\Delta U_x = 0,012$, $\Delta U_y = 0,09$, $\Delta U_z = 0,015$, $S_x = 0,08$, $S_y = 0,04$, $S_z = 0,013$. На основе этих расчетов установили, что оптимальным является полином пятой и выше степени.

Используя рассчитанные значения перемещений, определяли компоненты тензора деформации и скоростей деформации, а по их значениям – приращение степени деформации сдвига для объемного течения металла. Степень деформации сдвига определяли по формуле: $\Lambda = \sum \Delta \Lambda$. Для обработки результатов эксперимента составили программу в MATLAB.

На основе полученных результатов экспериментального моделирования установлено:

1. В начальный момент обжатия степень деформации сдвига локализуется на переходных контактных участках рабочей поверхности инструмента (рис. 2, 3).

2. Увеличение единичного обжатия приводит к переносу акцента степени деформации сдвига от

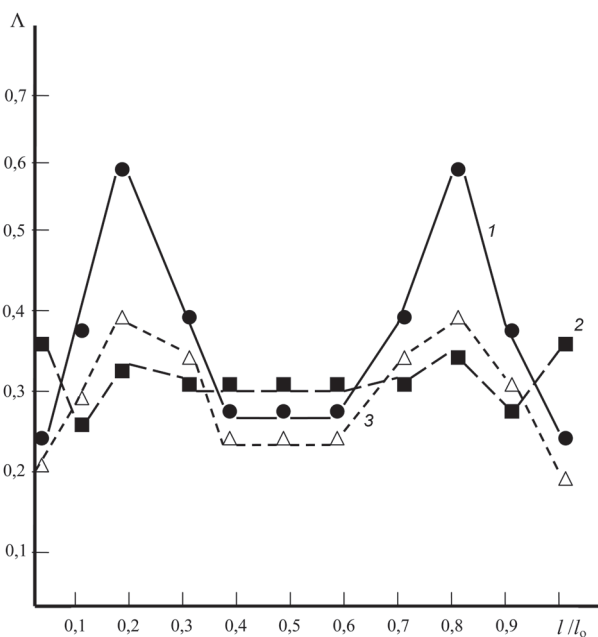


Рис. 2. Распределение степени деформации сдвига по сечению заготовки при отношении трапециевидного выступа m к трапециевидной впадине n , равным 0,7 (h , l – расстояние до исследуемой точки по высоте и длине заготовки; h_0 , l_0 – высота и длина очага деформации): 1 – $h/h_0 = 0,2$; 2 – 0,5; 3 – $h/h_0 = 0,8$

переходных контактных рабочих поверхностей к наклонным рабочим поверхностям инструмента (рис. 2, 3).

3. Деформирование заготовок в трапециевидных бойках обеспечивает интенсивную знакопеременную деформацию под наклонными рабочими поверхностями инструмента. Максимально возможный сдвиг реализуется при отношении трапециевидного выступа m к трапециевидной впадине n , равным 0,9 (рис. 2, 3) и при угле наклона наклонной рабочей поверхности инструмента α , равным 15–45° [4]. Однако при увеличении угла наклона рабочей поверхности инструмента уменьшается величина степени деформации сдвига под горизонтальными рабочими поверхностями инструмента.

4. На начальном этапе протяжки в трапециевидных бойках степень деформации сдвига сосредоточивается на участках перехода от одной рабочей поверхности к другой, что приводит к внедрению переходных участков инструмента в тело заготовки (см. рис. 1). Чтобы этого избежать, необходимо изготовить трапециевидные бойки с ра-

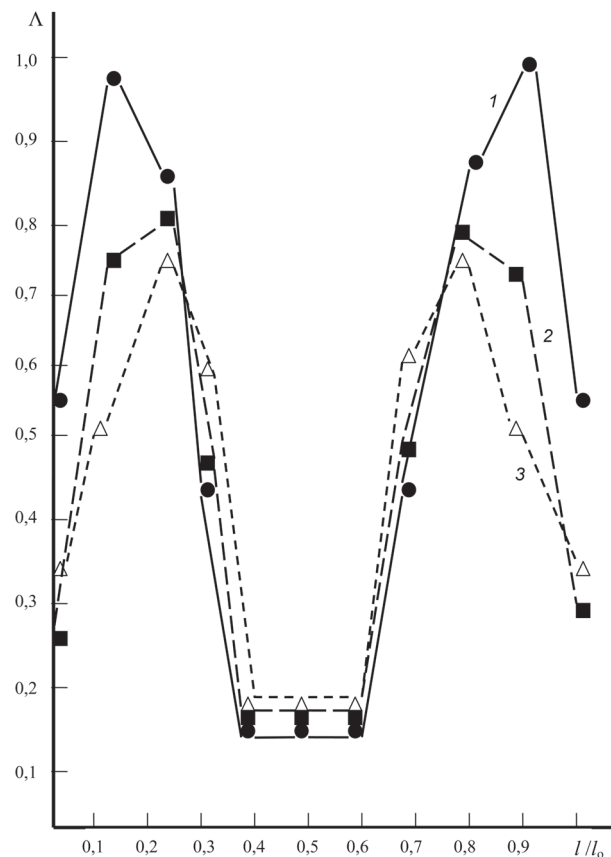


Рис. 3. Распределение степени деформации сдвига по сечению заготовки при отношении трапециевидного выступа m к трапециевидной впадине n , равным 0,9 (h , l – расстояние до исследуемой точки по высоте и длине заготовки; h_0 , l_0 – высота и длина очага деформации): 1 – $h/h_0 = 0,2$; 2 – 0,5; 3 – $h/h_0 = 0,8$

диусом закругления переходных участков 60 мм и больше в зависимости от геометрических размеров инструмента. Тогда отпечатки от переходов с большим радиусом закругления устраняются обкаткой в других по форме бойках.

5. При деформировании в трапециевидных бойках с соотношением m/n , равным 0,7–1,0, в начальный момент деформирования в переходных участках инструмента происходит смятие (см. рис. 1), а на последующих этапах деформации смятия переходят в срез, а под наклонными участками возникают макросдвиговые деформации (рис. 2, 3). Смятие и срез на начальном этапе протяжки могут привести к появлению в поверхностных зонах заготовки углублений на последующих обжатиях заготовки. Как было сказано выше, для устранения углублений необходимо, чтобы радиусы закруглений переходных участков инструмента были увеличены до 60 мм и выше.

6. На основе полученных экспериментальных данных нами подтверждена достоверность полу-

ченных результатов по деформированному состоянию с использованием программного комплекса MSC.SuperForge.

Таким образом, при ковке в бойках с трапециевидными выступами и впадинами макросдвиговые деформации локализуются в переходных участках рабочей поверхности трапециевидного инструмента и на участках заготовки, находящихся под данными участками. Такое сосредоточение макросдвиговых деформаций по сечению заготовки способствует путем подбора оптимальных деформационных режимовковки получать поковки с равномерно распределенными механическими свойствами. Так как это способствует повышению качества поковок [1], то необходимо использовать трапециевидные инструменты. Однако при ковке в таких бойках возможно образование поверхностных дефектов. Во избежание этого следует изготавливать трапециевидные инструменты с радиусом закругления переходных участков 60 мм и больше.

Литература

1. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
2. Машеков С. А., Биякаева (Смайлова) Н. Т., Нуртазаев А. Е. Исследование НДС заготовки при осадке в инструменте с изменяющейся рабочей формой с применением MSC.SuperForge // Материалы десятой Российской конференции пользователей систем MSC Software «MSC.Softwаre: комплексные технологии виртуальной разработки изделий (VPD). Опыт применения на предприятиях СНГ и стран Балтии». М., 2007.
3. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.
4. А. с. 1697963 / В.К. Воронцов, А.В. Котелкин, С.А.Машеков и др.: кл. В 21 J 1/04, 5/00 Оpubл. в Б.И. №46 15.12. 1991.