

УДК 621.73

В.Н. Перетьяко¹, С.А. Вахман², М.В. Филиппова¹, А.Б. Юрьев³

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² ООО «Новокузнецкий металлпрокатный завод»

³ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТЯЖКИ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КОВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Исследованиями [1, 2] установлено, что большинство механических свойств стали с литой структурой обычно ниже чем ковальной, так как литые слитки обладают значительной неоднородностью и пониженными пластическими свойствами. В связи с этим важным этапом в технологии изготовления деталей машиностроения является ковка, с помощью которой получают нужную форму поковки, а также исправляют недостатки литых слитков. При горячей деформации литой металл преобразуется в кованный, что благоприятно сказывается на его качестве.

Для выяснения причин неравномерной деформации поволоков по всему поперечному сечению, а также их осевой зоны необходимо изучение распределения интенсивности деформации металла по всему поперечному сечению поковки. В основном эти исследования проводятся для одностадийного обжатия заготовки в бойках различной формы, исследования двухстадийного обжатия, выполненные с помощью компьютерного моделирования, в литературе отсутствуют.

В кузнечно-прессовом цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» при изготовлении поволоков прокатных валков применяется свободная ковка на гидравлических прессах с использованием комбинированных бойков. Масса слитка 7 т. После биллетеровки получается заготовка диам. 850 мм. Из слитка куют два валка.

Рассмотрим результаты моделирования одностадийной и двухстадийной деформации круглой заготовки в комбинированных бойках. Компьютерное моделирование позволяет изучить распределение деформации по сечению деформируемой модели, величину деформации и степень обжатия, необходимую для преобразования литой структуры металла в деформированную.

Компьютерное моделирование проводили с использованием метода конечных элементов. В качестве модели использовали цилиндрическую заготовку диам. 850 мм из стали марки 50. Так как в кузнечных цехах на гидравлических прессах наиболее часто используются комбинированные бойки с углом выреза нижнего бойка 120°, считающегося наиболее универсальным для комбинированных бойков, то в данном исследовании использовались такие бойки. Условия моделирования: температура нагрева заготовки 1220 °С, ковка осуществлялась на гидравлическом прессе, обжа-

тия проводились без учета коэффициента трения между заготовкой и бойками.

При исследовании деформированного состояния тела разными авторами предлагаются различные способы определения степени деформации [1], степени обжатия [3] и относительного обжатия [4]. В настоящем исследовании для обозначения общего формоизменения деформируемого тела будет использоваться термин степень обжатия:

$$\varepsilon = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot 100\%,$$

где H_1 и H_2 – расстояние между бойками соответственно до и после обжатия модели, мм.

На практике при первой протяжке заготовки изменяют степени обжатия от 7 до 32 %, поэтому в настоящем исследовании на первой стадии была выбрана средняя величина степени обжатия $\varepsilon = 14\%$, что обусловлено ее реальной величиной, применяемой в кузнечно-прессовом цехе при обжатии заготовок указанного диаметра. Форма заготовки, получаемая в результате этого обжатия, пригодна для дальнейшей протяжки, так как хорошо устанавливается в комбинированных бойках после кантовки. Исходя из тех же положений для второй стадии обжатия заготовки приняли $\varepsilon = 11,0\%$.

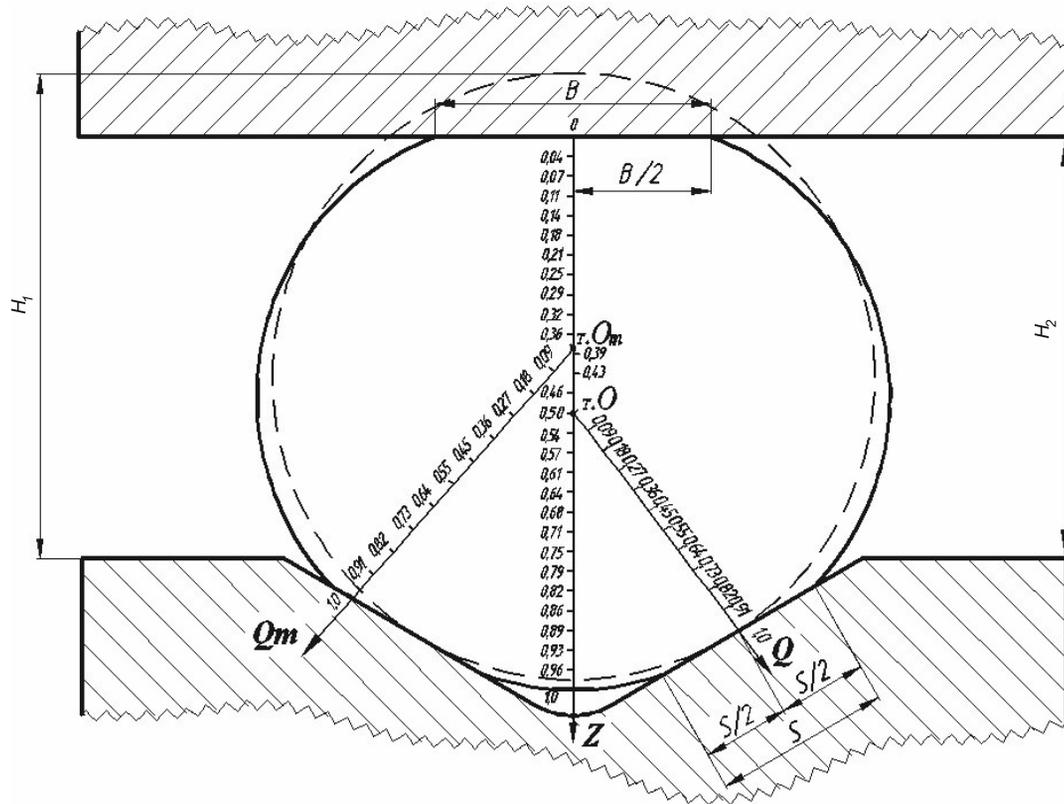
Интенсивность деформаций ε_i определяли по зависимости

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2},$$

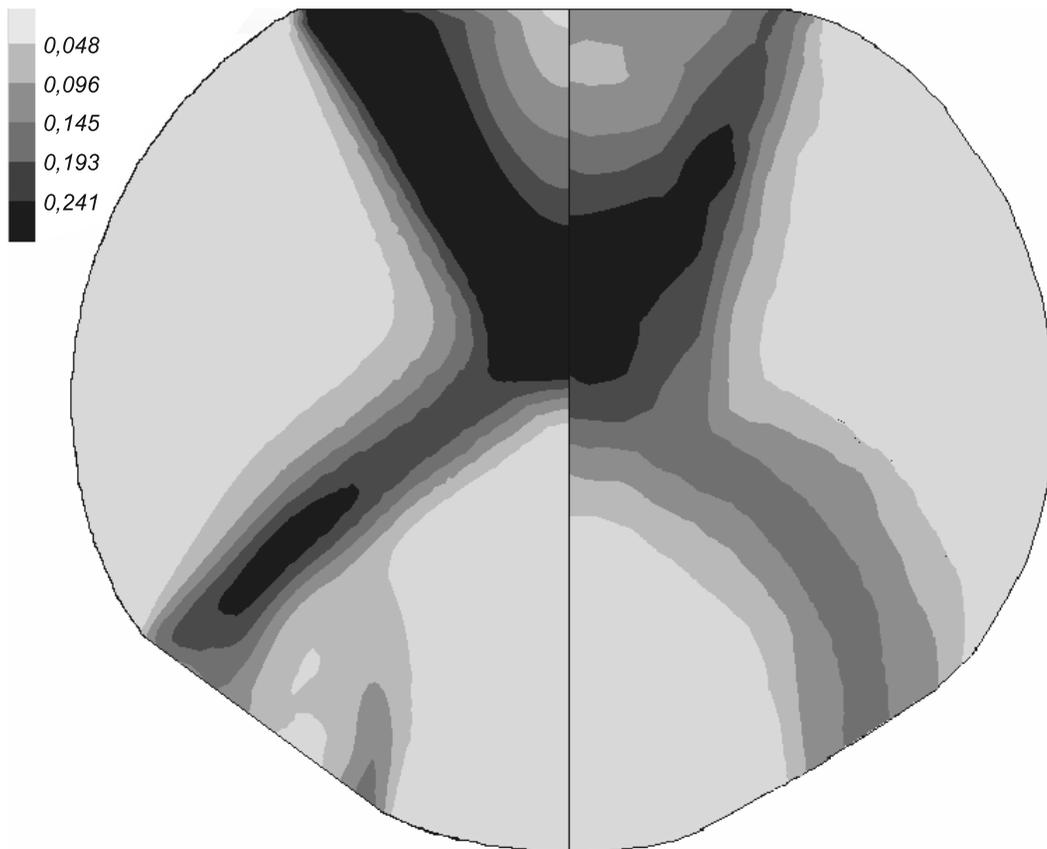
где ε_1 и ε_2 – главные компоненты деформации.

На рис. 1, б (левая сторона) приведено распределение полей интенсивности деформаций ε_i по сечению модели при компьютерном моделировании одностадийного деформирования заготовки в комбинированных бойках с $\varepsilon = 14\%$. В верхнем левом углу рис. 1, б представлена масштабная линейка, по которой можно определить величину интенсивности деформаций осажденной заготовки.

Как видно из этого рисунка, у модели имеются характерные зоны интенсивной деформации (черный цвет) и зоны затрудненной деформации (белый цвет). Последние при $\varepsilon = 14\%$ имеют значения ε_i от нуля



a



б

Рис. 1. Одностадийное деформирование:
 а – схема замеров интенсивности деформаций вдоль осей Z , Q , Q_m ; б – поля интенсивности деформаций по сечению заготовки

до 0,05. Зона с максимальными значениями интенсивности деформаций $\epsilon_i = 0,24 \div 0,44$ имеет *V*-образную форму и располагается от краев плоского бойка до центральной части модели. При этом максимальные значения $\epsilon_i \approx 0,44$ располагаются в осевой зоне, что говорит об ее интенсивной проработке. Две другие зоны интенсивной деформации модели распределяются от ее центра в направлении выреза бойка, в них присутствует пластическая деформация, которая распространяется от места соприкосновения модели с нижним бойком до ее осевой зоны.

По результатам компьютерного моделирования построены графики распределения интенсивности деформаций в направлении различных осей модели.

Измерения численных значений интенсивности деформаций осуществляли по схеме, представленной на рис. 1, а, откуда видно, что измерения проводятся в направлениях осей *Z*, *Q* и *Q_m*. Ось *Z* – это вертикальная ось, в направлении которой движется верхний боек, также она является осью симметрии для модели. Ось *Q* – это ось, которая всегда берет свое геометрическое начало в точке *O* (точка *O* – плавающая в зависимости от степени обжатия заготовки, она является серединой высоты модели и всегда совпадает с точкой *Z* = 0,5), направлена ось *Q* в сторону нижнего бойка и пересекает его в точке, являющейся серединой поверхности *S* (поверхности соприкосновения обжатой заготовки с нижним вырезным бойком). Ось *Q_m* – это ось, которая берет свое начало в точке *O_m* и направлена в сторону рабочей плоскости нижнего вырезного бойка, где сосредоточены максимальные значения интенсивности деформаций в

модели. Цифрами на рис. 1, а обозначены точки, в которых проводили измерения значений интенсивности деформаций.

На рис. 2, а показан график распределения интенсивности деформаций вдоль оси *Z* при одностадийном деформировании модели с $\epsilon = 14\%$. Видно, что кривая распределения ϵ_i имеет неоднородный пикообразный вид на расстоянии от *Z* = 0 до *Z* = 0,57. На этом участке значения ϵ_i начинают увеличиваться в точке *O* и возрастают до максимального значения $\epsilon_i = 0,43$, которое находится на расстоянии *Z* = 0,39. После этого значения ϵ_i уменьшаются до нуля на расстоянии *Z* = 0,57 и остаются на этом уровне до *Z* = 1,00.

На рис. 2, б показаны графики распределения интенсивности деформаций вдоль наклонных осей *Q* и *Q_m* при одностадийном деформировании модели. Видно, что кривая распределения ϵ_i вдоль оси *Q* берет свое начало в точке *O*, где имеет свое максимальное значение $\epsilon_i = 0,14$, затем резко падает до $\epsilon_i = 0,03$ в точке *Q* = 0,18, после чего уменьшается плавно до минимальной величины $\epsilon_i = 0,01$ в точке *Q* = 0,45. После этой точки значения ϵ_i начинают увеличиваться по волнообразной кривой до $\epsilon_i = 0,06$ в точке *Q* = 1,00. Таким образом, видно, что по мере удаления от поверхности вырезного бойка в глубь заготовки значения ϵ_i уменьшаются от больших к меньшим до точки *Q* = 0,45, после которой вновь начинается рост значений ϵ_i до максимальных. Это вызвано деформацией модели под действием верхнего плоского бойка.

Для получения более полной информации о деформации по сечению модели дополнительно проводили измерения параметра ϵ_i вдоль оси *Q_m*. На рис. 2, б при компьютерном моделировании кривая распределения ϵ_i вдоль наклонной оси *Q_m* имеет волнообразный вид. Максимальные значения ϵ_i локализуются вблизи точки *O*, и по мере движения вдоль оси *Q_m*, от точки *Q_m* = 0 к *Q_m* = 1, они сначала уменьшаются до $\epsilon_i = 0,20$ в точке *Q_m* = 0,27, а затем плавно увеличиваются до $\epsilon_i = 0,26$ в точке *Q_m* = 0,73, после чего вновь уменьшаются до $\epsilon_i = 0,15$ в точке *Q* = 1. Резкие изменения в виде волны вдоль оси *Q_m* говорят о том, что деформация на данном участке модели не однородная.

Заготовку после первого обжатия кантовали на 180° и деформировали повторно со степенью обжатия $\epsilon = 11,0\%$ в комбинированных бойках. Распределение полей интенсивности деформаций по сечению заготовки после двух обжатий с промежуточной кантовкой, полученные с помощью компьютерного моделирования, приведены на рис. 3, б (левая сторона). Видно, что поля интенсивности деформаций ϵ_i по сечению модели неоднородны, поля с наибольшим значением ϵ_i от 0,26 и выше, локализуются в центре модели и имеют *V*-образный вид. По диагоналям от центра модели в направлении верхнего и нижнего бойков поля наиболее интенсивной деформаций лучами направляются к краям модели, которые соприкасаются с вырезом нижне-

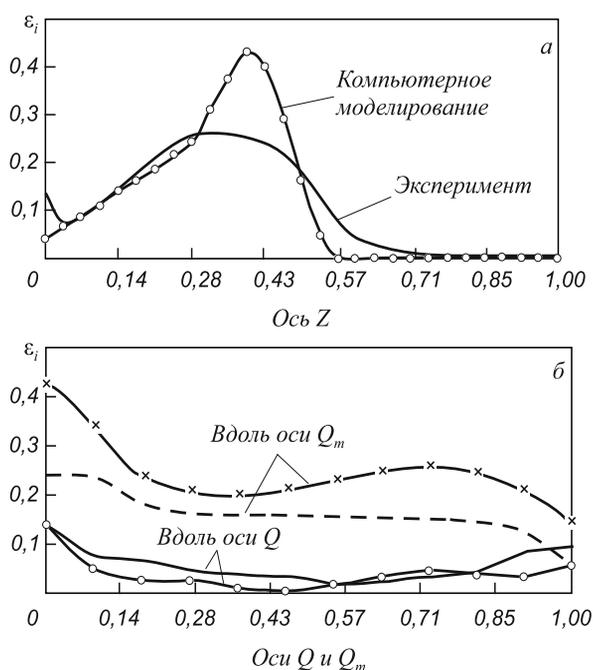
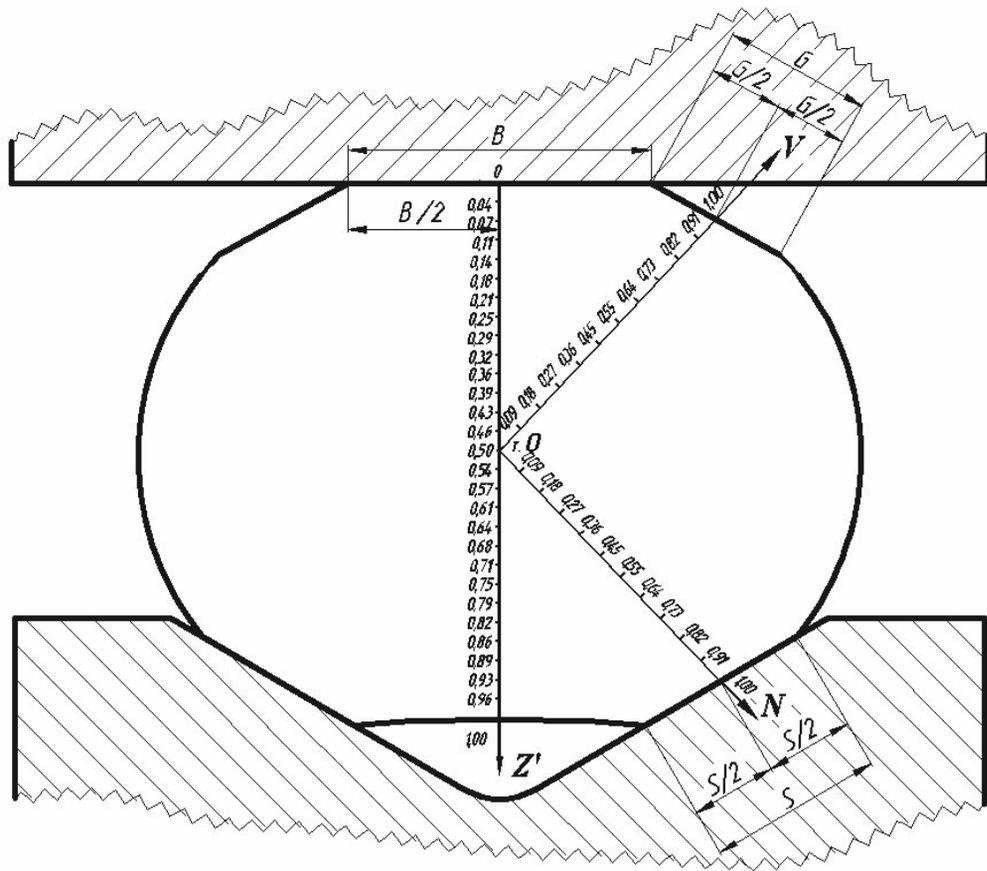
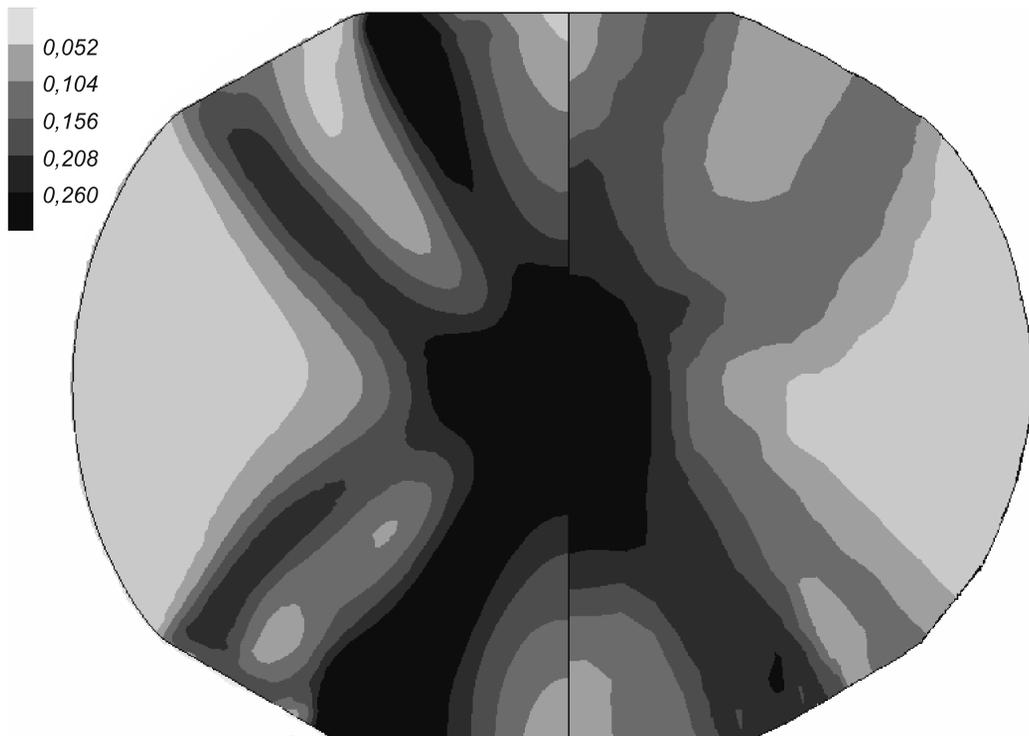


Рис. 2. Распределение интенсивности деформаций по оси *Z* (а) и по осям *Q* и *Q_m* (б) при одностадийном деформировании: — и - - - - при экспериментальном моделировании; -x- и -o- - при компьютерном моделировании



a



б

Рис. 3. Двухстадийное деформирование:
 а – схема замеров интенсивности деформаций вдоль осей Z' , V , N ; б – поля интенсивности деформаций по сечению заготовки

го бойка. При этом к нижнему краю распространяется поле с максимальными значениями ϵ_i , а к верхнему краю модели, касающегося бойка, распространяется поле со средними значениями $\epsilon_i = 0,16 \div 0,21$, в которых выделяются поля со значениями $\epsilon_i = 0,21 \div 0,26$. Можно сказать, что в верхней части модели наблюдается такая же схема деформации, как и в нижней, однако в верхней поля со значениями $\epsilon_i = 0,16 \div 0,21$, отходящие от центра модели, по своей площади приблизительно в три раза меньше аналогичных полей в нижней части модели, а эти же по величине поля, распространяющиеся к другому краю модели, в полтора раза больше аналогичных полей, распространяющихся в нижней части модели.

Зоны затрудненной деформации при $\epsilon = 14,0\%$ имеют значения $\epsilon_i = 0 \div 0,05$ и по своей площади занимают одну треть всех полей. Из представленных полей ϵ_i видно, что для получения однородной деформации по сечению модели необходимо увеличить степень обжатия, что в данном случае невозможно, поскольку будет иметь место отклонение от требуемого диаметра поковки и увеличение поперечных размеров последней, что может повлечь ее искривление вдоль продольной оси модели.

Измерения численных значений интенсивности деформаций по сечению модели, подвергнутой двухстадийному деформированию, проводили по схеме, представленной на рис. 3, а. Измерения осуществляли в направлениях осей Z' , V и N . Ось Z' – это вертикальная ось, в направлении которой движется верхний боек, она также является осью симметрии для модели. Ось V – это ось, которая берет свое геометрическое начало в точке O (точка O выбирается таким же образом, как и при одностадийном деформировании), направлена она в сторону верхнего бойка и пересекает наклонную поверхность заготовки в середине поверхности G , образованной у заготовки при первом одностадийном обжатии. Ось N – это ось, которая так же, как и ось V , берет свое геометрическое начало в точке O и направлена в сторону нижнего бойка, пересекает его в точке, являющейся серединой поверхности S (поверхности соприкосновения обжатой заготовки с нижним вырезным бойком). Цифрами на рис. 3, а обозначены точки, в которых проводили измерения интенсивности деформаций.

На рис. 4, а показан график распределения интенсивности деформаций при двухстадийном деформировании модели вдоль оси Z' . Видно, что при компьютерном моделировании кривая распределения ϵ_i вдоль оси Z' имеет куполообразный вид. Так, вдоль оси Z' на расстоянии от нуля до 0,43 происходит увеличение значений ϵ_i практически по линейной зависимости. Максимальное значение, достигаемое на этом участке, составляет $\epsilon_i = 0,45$. Далее кривая показывает уменьшение: $\epsilon_i = 0,39$ в точке $Z' = 1,00$. При этом кривая имеет волнообразный вид, это говорит о том, что на участке вдоль оси Z' от 0,54 до 0,61 значения ϵ_i остаются прак-

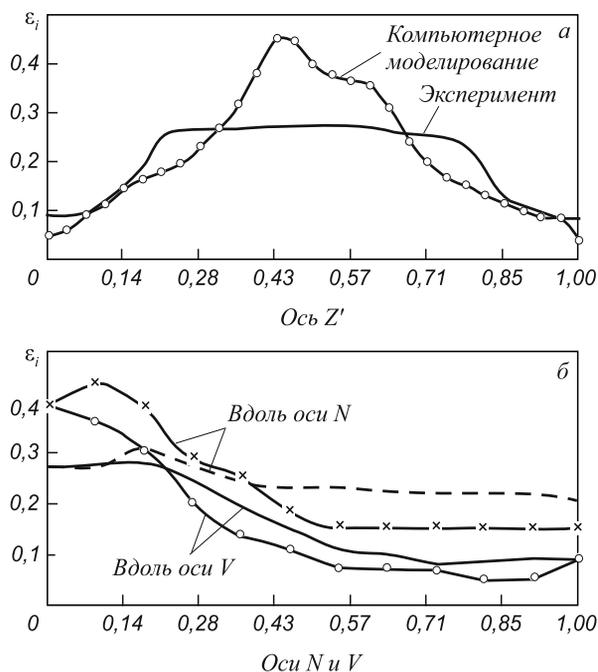


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций по оси Z (а) и по осям V и N (б) при двухстадийном деформировании: — \times и \circ — — при компьютерном моделировании; — и — — при экспериментальном моделировании

тически без изменений с незначительным уменьшением от $\epsilon_i = 0,37$ до $\epsilon_i = 0,35$, что обеспечивает однородную деформацию на данном участке.

На рис. 4, б показаны графики распределения интенсивности деформаций при двухстадийном деформировании модели вдоль наклонных осей N и V . Видно, что при компьютерном моделировании в точке O начинается увеличение значений ϵ_i от 0,39 до максимального 0,44 в точке $N = 0,1$. Этот участок можно охарактеризовать неоднородной деформацией. Затем значения ϵ_i плавно практически в линейной зависимости уменьшаются до $\epsilon_i = 0,15$ на расстоянии $N = 0,54$ от точки O и до расстояния $N = 1,00$ остаются почти без изменения на одном уровне, что говорит об однородности деформации на этом участке.

Из графика распределения ϵ_i вдоль наклонной оси V видно, что при компьютерном моделировании в точке O начинается уменьшение значений ϵ_i от максимального 0,41, до 0,07 на расстоянии $V = 0,54$ от точки O . Этот участок можно охарактеризовать равномерным снижением деформации. Затем значения ϵ_i практически не изменяются и остаются на указанном уровне до расстояния $V = 0,91$ от точки O , что говорит об однородности деформации на данном участке, а затем происходит рост значений ϵ_i до 0,09 в точке $V = 1,00$, что обусловлено локализацией деформации в месте соприкосновения модели с вырезом нижнего бойка.

Для проверки адекватности компьютерного моделирования экспериментально исследовали деформированное состояние свинцовой заготовки при ее плоскодеформированном обжатии в комбинированных

бойках. При этом использовали методику определения интенсивности деформаций по изменению размеров делительной сетки методом И.П. Ренне [5]. Для этого на свинцовую заготовку – диск диам. 85 мм и шириной 20 мм – на внутреннюю сторону наносилась прямоугольная делительная сетка с размерами сторон ячеек 3×3 мм с отклонением не более ±0,04 мм. После этого два диска складывались вместе и обжимались в специальном устройстве, обеспечивающем плоскую деформацию заготовки. Затем искаженная делительная сетка сканировалась и с помощью графического пакета AutoCAD и вычислительного пакета MathCAD выполнялись расчеты интенсивности деформаций по сечению заготовки, построение полей и графиков распределения интенсивности деформаций. Свинцовая заготовка подвергалась одностадийному и двухстадийному деформированию с теми же степенями обжатия, что и при компьютерном моделировании. Поля распределения интенсивности деформаций по сечению свинцовой заготовки представлены на рис. 1, б и 3, б.

Сравнивая левые и правые части этих рисунков, можно отметить, что результаты компьютерного моделирования по распределению интенсивности деформаций при одностадийном и двухстадийном деформировании круглой модели в комбинированных бойках достаточно близко совпадают с результатами экспериментальных исследований. Сравнение опытных данных с результатами компьютерного моделирования показало надежность последнего для решения задач обработки металлов давлением.

Выводы. При одностадийном обжатии поковки прокатных валков со степенью обжатия 14 % де-

формация распространяется на всю высоту поковки. Имеются зоны с низким значением интенсивности деформаций. После кантовки на 90° и повторной деформации с обжатием 11,0 % (двухстадийное деформирование) зоны с повышенной интенсивностью деформаций занимают большую площадь сечения поковки. Однако на боковых участках поковки интенсивность деформаций незначительна. Сравнивая значения интенсивности деформаций по результатам компьютерного и физического моделирования, можно отметить, что компьютерное моделирование адекватно описывает величину интенсивности деформаций при протяжке металла, обеспечивает необходимую точность расчетов и может быть использовано для решения технологических задач обработки металлов давлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1955. – 230 с.
2. Трубин В.Н., Гарновский И.Я. Ковка крупных поковок: Результаты исследования технологических режимов. – М., Свердловск: Машгиз, 1962. – 224 с.
3. Иванушкин П.Ф., Каргин Б.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 1. С. 96 – 100.
4. Алтыкис А.В., Колосков М.М., Назарян В.А. // Кузнечно-штамповочное производство. 1973. № 8. С. 3 – 8.
5. Ренне И.П. – В сб. трудов Тульского механического института «Технология машиностроения». – Тула: изд. ТМИ, 1966. С. 49 – 54.

© 2012 г. В.Н. Перетьяко, С.А. Вахман,
М.В. Филиппова, А.Б. Юрьев
Поступила 1 марта 2012 г.

УДК 621.746.552.669.14 (0.43)

В.П. Антонов, Н.И. Таран, В.Я. Климов, Н.И. Швидков

Сибирский государственный индустриальный университет

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПРИ НУЛЕВОЙ ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ

Ю.А. Нехендзи [1] высказал предположение, что нулевую жидкотекучесть стали определяют 20 % твердой фазы в потоке. В более поздних работах им было высказано, что это количество может быть иным, но никто не исследовал зависимость количества твердой фазы ϵ_0 при нулевой жидкотекучести от содержания углерода в стали.

В результате совместного решения уравнений теплового баланса Ньютона и Бернулли, описывающего законы гидравлики при течении жидкости, получено выражение [2] для определения величина ϵ_0 по показаниям спиральной пробы на жидкотекучесть:

$$\epsilon_0 = \frac{(T_1 - T_n) - k(T_2 - T_n)}{\left[(T_n - T_c) + (1 + \beta) \left(\frac{\rho}{c} \right) \right] (k - 1)}; \quad (1)$$

$$k = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{(1 + 0,0128 L_1)^{3/2} - 1}{(1 + 0,0128 L_2)^{3/2} - 1}, \quad (2)$$

где T_n – температура ликвида; T_c – температура солидуса; β – относительная объемная усадка сплава при затвердевании; ρ – теплота кристаллизации сплава; c – удельная теплоемкость жидкого металла; τ_1, τ_2 – расчетное время течения металла по каналу пробы на расстояниях