

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПРОТЯЖКЕ УКРОЧЕННЫХ СЛИТКОВ БОЙКАМИ СО СКОСАМИ

Марков О. Е.

В работе предложен новый технологический процессковки укороченных слитков без осадки плоскими бойками со скосами. Используя установленную связь компонент напряжений и деформаций, разработан программный продукт на основе метода конечных элементов. Моделирование процессаковки в разработанном программном продукте позволило установить распределение деформаций и формоизменение заготовки для новой технологии. Исследовались различные углы скосов бойков (равные 10, 20 и 30 градусов) и длины горизонтальных участков этих бойков. При углах скоса бойков в 30° и узких деформирующих кромках происходит равномерное распределение деформаций в объеме поковки. Рациональной геометрией инструмента для интенсификации вытяжки при ковке укороченных слитков являются бойки с углом скосов 20–30° и соотношением $b / B = 0,5–0,3$. Экспериментальные исследования на свинцовых образцах подтверждают результаты конечно-элементного моделирования.

У роботі запропоновано новий технологічний процес кування укорочених злитків без осадження плоскими бойками зі скосами. Використовуючи встановлений зв'язок компонент напружень і деформацій, розроблений програмний продукт на основі методу скінчених елементів. Моделювання процесу кування в розробленому програмному продукті дозволило встановити розподіл деформацій і формозміну заготовки для нової технології. Досліджувалися різні кути скосів бойків (10, 20 і 30 градусів) і довжини горизонтальних ділянок цих бойків. При кутах скоса бойків в 30° і вузьких деформуючих крайках відбувається рівномірний розподіл деформацій в об'ємі поковки. Рациональною геометрією інструменту для інтенсифікації витяжки при куванні укорочених злитків є бойки з кутом скосів 20–30° і співвідношенням $b / B = 0,5–0,3$. Експериментальні дослідження на свинцевих зразках підтверджують результати кінцево-елементного моделювання.

In this paper, a new process of forging short-ingots without upsetting by flat dies with bevels was proposed. The software based on the finite element method with using of an established equation of component stresses and strains was developed. Modelling of a forging process with using of the developed software has allowed to determined of strain distribution and forming of the workpiece during forging for new technology. Various angles of the dies bevels (equal to 10, 20 and 30 degrees) and the horizontal length of the dies were studied. At the dies bevel angles of 30° and the narrow deforming-edges there is an uniform distribution of the stain in the forging volume. Rational geometry of a tool for intensification of an elongation during forging shortened-ingots are truncated dies with the bevels angle 20–30° and the ratio $b / B = 0,5–0,3$. Experimental studies on lead samples confirm the results of finite element modelling.

Марков О. Е.

д-р техн. наук, проф. ДГМА
oleg_markov_omd@mail.ru

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.735.36

Марков О. Е.

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПРОТЯЖКЕ УКОРОЧЕННЫХ СЛИТКОВ БОЙКАМИ СО СКОСАМИ

Развитие тяжёлого и энергетического машиностроения, являющихся базовыми экспортно-ориентированными отраслями промышленного комплекса Украины, неразрывно связано с повышением качества и снижением себестоимости деталей крупных машин, осуществляемых на основе совершенствования существующих и создания новых конкурентоспособных технологий изготовления заготовок, получаемых ковкой слитков [1]. Существующие технологические процессыковки не обеспечивают стабильного высокого качества крупных поковок из-за наличия внутренних осевых дефектов сплошности, обусловленных осевой пористостью исходного слитка, которая не всегда полностью устраняется кузнечными операциями, поэтому строение литой заготовки и применяемые операцииковки во многом определяют качество будущей поковки [2].

В настоящее время возможность снижения или устранения внутренних дефектов в поковках косвенно оценивается значением коэффициента укова, для увеличения которого назначают операцию осадки. При этом коэффициент укова характеризует только деформированное состояние поковки и не учитывает изменение напряженного состояния металла в заготовке при её деформировании, которое в значительной степени определяет вероятность заваривания внутренних дефектов [3]. Таким образом, коэффициент укова не может выступать всеобъемлющим параметром оценки качества получаемых поковок. Данный факт раскрывает научное противоречие в части подхода к повышению качества крупных поковок и совершенствованию процессовковки, что требует дополнительного обоснования необходимости применения операции осадки или возможности отказа от нее. Кроме того, осадка обеспечивает неблагоприятное деформированное состояние металла в осевой зоне, которое приводит к высокой неравномерности распределения деформаций, а, следовательно, и проработки литой структуры. В соответствии с этим концепция повышения качества крупных поковок должна заключаться в применении эффективных схемковки, позволяющих минимизировать внутренние дефекты сплошности получаемых заготовок [4].

Разработка новых технологических процессовковки крупных поковок предполагает значительные затраты материальных ресурсов на проведение экспериментальных исследований, обеспечивающих получение исходной информации для проектирования технологического процесса. Отмеченное требует расширения возможностей математического моделирования процессовгорячего пластического деформирования. Для более полного учета физикомеханических явлений, протекающих в объеме заготовки при температурахковки и влияющих на напряженно-деформированное состояние (НДС) [5].

Как было отмечено ранее, для исключения операции осадки из технологического цикла изготовления валов необходимо применять укороченные слитки [3]. Использование таких заготовок позволит избежать раскрытия осевых дефектов в центральной зоне слитка при осадке. Однако слитки с малым соотношением H/D требуют применения схемковки, которые обеспечивают интенсивное удлинение при протяжке, а соответственно эти способыковки будут способствовать снижению трудоемкостиковки. Использование бойков со скосами (рис. 1) позволит обеспечить более интенсивное течение металла в осевом направлении (вытяжку). Исключение операции осадки, а также более интенсивное течение металла в осевом направлении позволят уменьшить энерго- и трудоемкость процессаковки.

Важное направление разработки ресурсосберегающих технологических процессовковки крупных поковок – совершенствование методов математического моделирования, позволяющего получить необходимую информацию о течении металла, оценить влияние

различных параметров на распределение деформаций в теле заготовки. Моделирование процессовковки со свободным истечением металла, многопереходностью операций, сменой знака деформирования, учетом тепловых процессов и наличием внутренних дефектов заготовки представляет сложную задачу для исследователей. Одним из методов, который может дать приемлемое решение, является метод конечных элементов (МКЭ) [5], развитый применительно к моделированию процессов горячей ОМД.

Цель исследования – установить влияние угла скоса бойков на равномерность распределения деформаций по сечению заготовки при протяжке и формоизменение заготовки.

На распределение деформаций в теле заготовки и формоизменение влияют два основных фактора: отношение рабочей ширины бойка к общей его ширине b / B и угол скоса бойка β (рис. 1). Каждый фактор варьировался на трех уровнях ($b / B - 0,3 \div 0,5 \div 0,7$, угол $\beta - 10^\circ \div 20^\circ \div 30^\circ$). Для проведения данного исследования необходимо провести $3^2 = 9$ компьютерных экспериментов (табл. 1). Относительная степень деформации при протяжке $\varepsilon = 40 \%$, что соответствует коэффициенту укова 2,65.

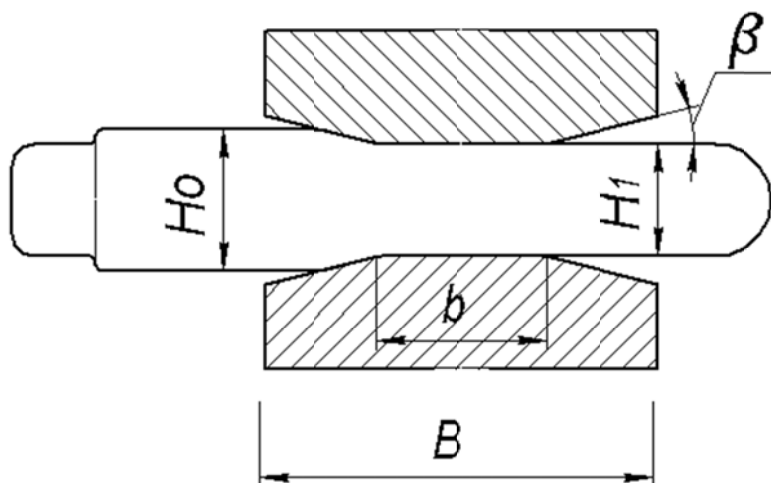


Рис. 1. – Схема протяжки бойками со скосами

Таблица 1

Размеры исследуемых бойков

b / B	β , град	B , мм	b , мм
0,3	10	520	156
0,5	20	520	260
0,7	30	520	350

В настоящее время математические аппараты существующих коммерческих программных продуктов не позволяют учитывать процессы разупрочнения, которые протекают в металле, при температуре выше температуры рекристаллизации. Эти процессы существенным образом влияют на затраты энергии на ковку и деформационное поле заготовки.

При решении задач МКЭ необходимо задать реальную связь между напряжениями и скоростями деформаций $\{\dot{\varepsilon}\}$ материала для различных термомеханических параметров при горячей деформации. Для горячего пластического деформирования, когда наряду с процессами упрочнения происходит разупрочнение. Адекватной реологической моделью служит связь компонент напряжений и скоростей деформаций, предложенная в работе [6]:

$$\sigma_{xx} = E \cdot \dot{\epsilon}_{xx} \cdot t \cdot e^{-\frac{t}{T}},$$

где E – модуль упругости Юнга, МПа;

t – время деформирования, с;

T – время релаксации, с.

С использованием полученных соотношений на кафедре «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии был разработан программный продукт на основе МКЭ. Исходные данные для расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчёта

Параметр	Значение	Параметр	Значение
1. Приращение деформации	0,5 %	6. Температура воздуха	30 °С
2. Обжатие за проход	5 %	7. Температура началаковки	1180 °С
3. Уков	3,65	8. Начальная температура бойков	20 °С
4. Угар	5 %	9. Количество элементов по оси X	90
5. Скорость деформирования	30мм / с	10. Количество элементов по оси Y	70

Ковка бойками с углом скоса $\beta = 10^\circ$. На рис. 2 представлено распределение деформаций при протяжке бойками с углом скосов $\beta = 10^\circ$ и соотношением $b / B = 0,3 \div 0,5 \div 0,7$, соответственно.

Для этого угла скосов характерно снижение волнистости на поверхности заготовки, уменьшением глубины впадин, количества поверхностных зажимов и наплыва металла тела слитка на цапфу (рис. 2, б). При этом происходит увеличение уровня пластических деформаций в осевой зоне с уменьшением неравномерности их распределения по сечению $\Delta\epsilon = 0,2$ единицы (рис. 2, а). С увеличением относительной длины деформирующего пояса бойка ($b / B = 0,7$) уровень пластических деформаций в осевой зоне больше, чем на поверхности заготовки (рис. 2, а; кривая 3). При этом увеличивается неравномерность распределения деформаций ($\Delta\epsilon = 0,6$). Эта схемаковки способствует проработки центральных слоев слитка, однако остальной объем поковки имеет недостаточный уровень накопленных пластических деформаций (рис. 2, б).

Количественная оценка деформированного состояния для различных длин плоского участка бойка для угла скосов бойков $\beta = 10^\circ$ позволяет сделать вывод о преимущественном течении поверхностных слоев на расстоянии 0,4–0,8 радиуса заготовки (рис. 2, а). Процесс интенсивного течения металла поверхности заготовки приводит к образованию наплывов тела слитка на цапфу с последующим складкообразованием, особенно для узких деформирующих плоских площадок бойков.

Ковка бойками с углом скоса $\beta = 20^\circ$. Увеличение угла скосов бойков способствует повышению равномерности распределения деформаций по сечению поковки (рис. 3). При малых длинах деформирующей плоской площадки ($b / B = 0,3$) неравномерность распределения деформаций составляет $\Delta\epsilon = 0,1$ единиц (рис. 3, а; кривая 1). При ковке слитков бойками с соотношением $b / B = 0,3$ и 0,5 на поверхности поковки образуются зажимы (рис. 3, б).

С увеличением ширины плоской площадки до $b / B = 0,7$ значения неравномерности распределения деформаций незначительно увеличиваются $\Delta\epsilon = 0,5$ единиц (рис. 3, а; кривая 3). Это объясняется снижением влияния угла скосов бойков при увеличении ширины плоского участка бойка за счет увеличения площади контакта заготовки с инструментом.

Форма эпюры распределения деформаций в поперечном сечении заготовки повторяет форму прибыльного торца заготовки, на котором образуется кольцевая выпуклость на расстоянии примерно 0,6–0,8 радиуса поковки, что приводит к последующему складкообразованию между цапфой и телом слитка (рис. 3, б). Увеличение ширины рабочей части бойка приводит к исключению образования складки от наплыва металла на цапфу и снижению количества поверхностных зажимов и вмятин.

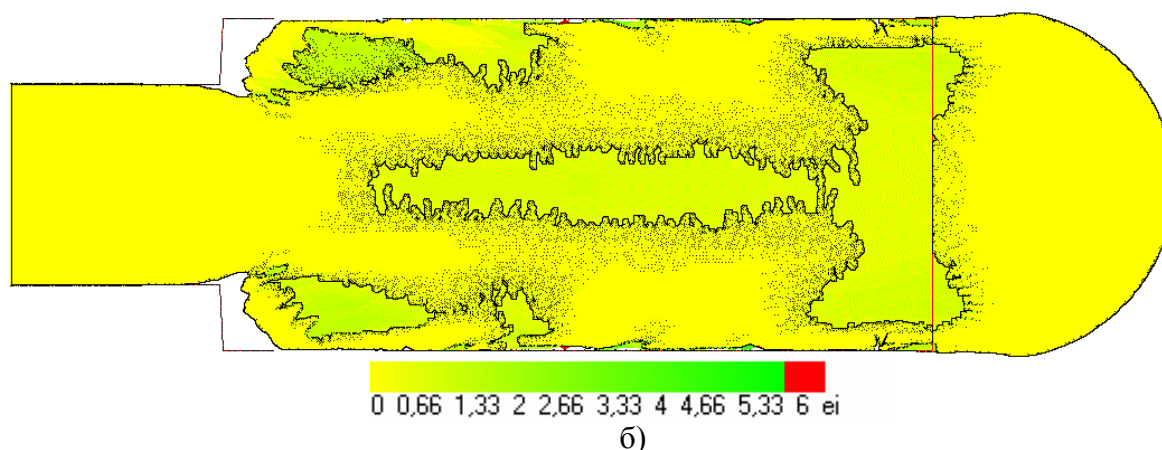
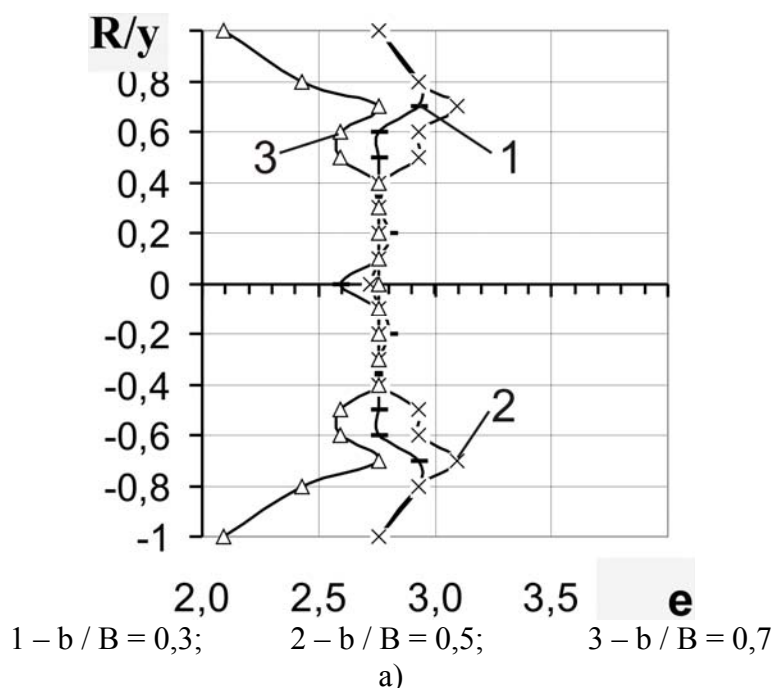


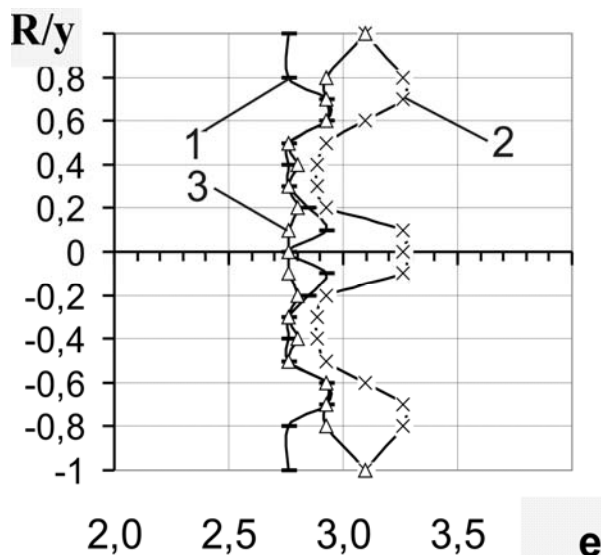
Рис. 2. – Распределение логарифмических деформаций при ковке бойками с углом скосов $\beta = 10^\circ$ по радиусу заготовки (а) и продольному сечению поковки при $b/V = 0,5$ (б)

При ковке слитков бойками с соотношением $b/V = 0,3$ и $0,5$ на поверхности поковки образуются зажимы, обозначенные на продольном разрезе красным цветом (рис. 3, б).

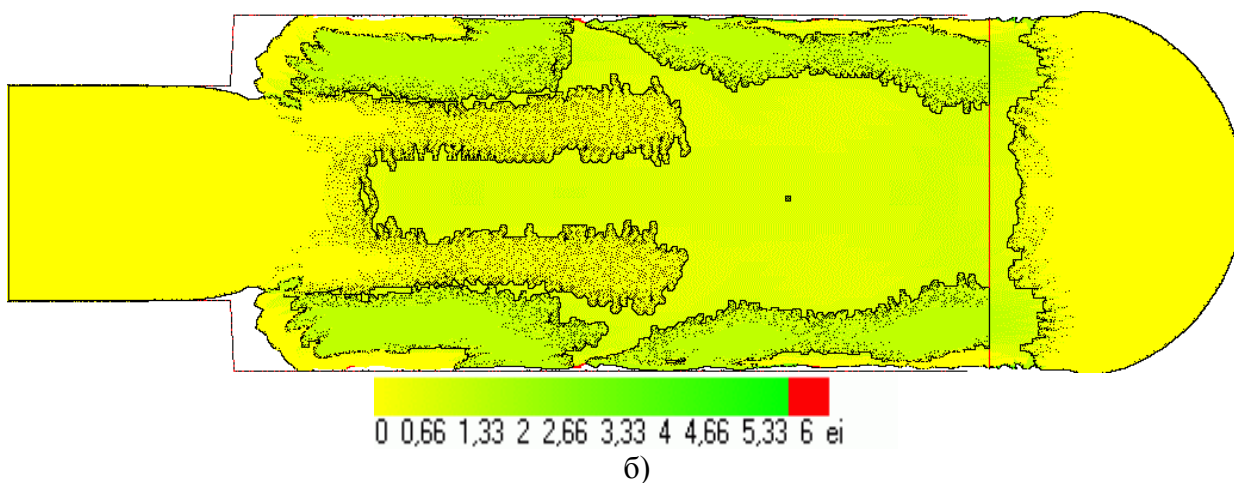
Ковка бойками с углом скоса $\beta = 30^\circ$. На рис. 4 представлено распределение логарифмических деформаций при протяжке по сечению поковки бойками с углом скосов $\beta = 30^\circ$ и соотношениями: $b/V = 0,3$ (кривая 1), $b/V = 0,5$ (кривая 2), $b/V = 0,7$ (кривая 3).

При протяжке бойками с узкой деформирующей плоской площадкой ($b/V = 0,3$) происходит накопление высокого уровня пластических деформаций ($e = 3,0–3,7$) в теле поковки (рис. 4, а; кривая 1). Более того, деформации распределяются равномерно в объеме (рис. 4, б).

Максимальная неравномерность их распределения составляет $\Delta e = 0,5$ единиц. Ковка до заданных размеров не приводит к образованию зажима между цапфой и телом заготовки. Однако в процессековки образуется волнистая поверхность поковки, которая будет требовать дополнительной ее правки для снижения припуска на механическую обработку. Уменьшить образование поверхностной волнистости можно также за счет уменьшения величины обжатия за нажим пресса.



1 – $b / B = 0,3$; 2 – $b / B = 0,5$; 3 – $b / B = 0,7$
а)



б)

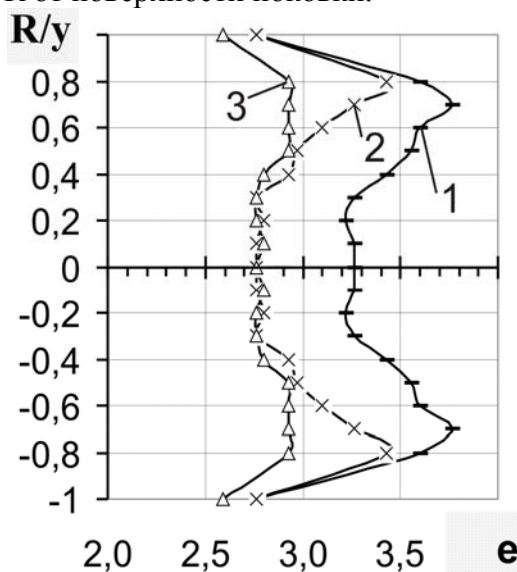
Рис. 3. – Распределение логарифмических деформаций при ковке бойками с углом скосов $\beta = 20^\circ$ по радиусу заготовки (а) и продольному сечению поковки при $b / B = 0,5$ (б)

Ковка бойками с углом скоса $\beta = 30^\circ$. На рис. 4 представлено распределение логарифмических деформаций при протяжке по сечению поковки бойками с углом скосов $\beta = 30^\circ$ и соотношениями: $b / B = 0,3$ (кривая 1), $b / B = 0,5$ (кривая 2), $b / B = 0,7$ (кривая 3).

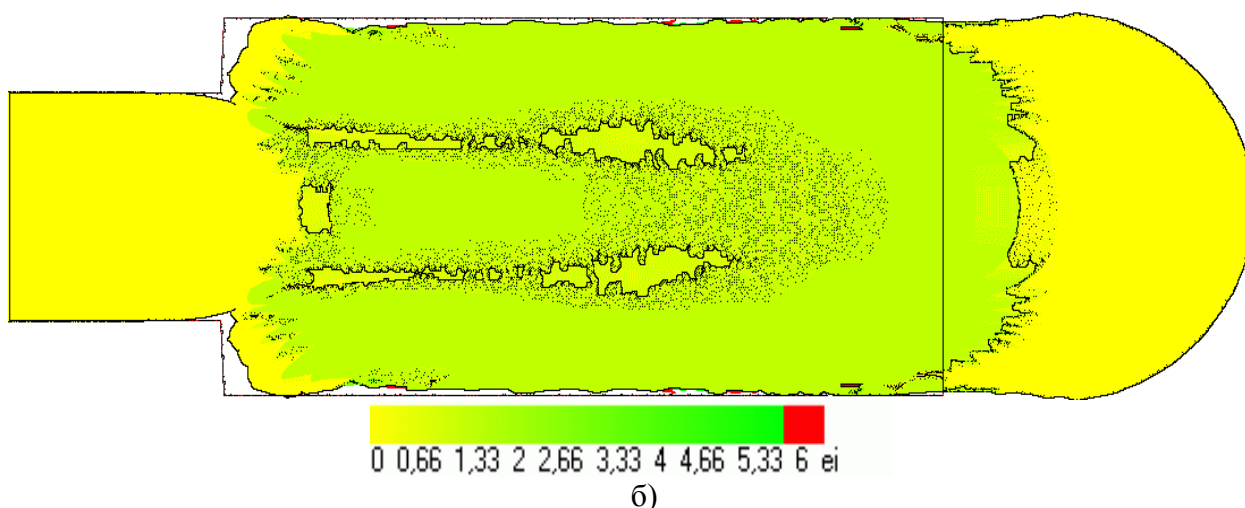
При протяжке бойками с узкой деформирующей плоской площадкой ($b / B = 0,3$) происходит накопление высокого уровня пластических деформаций ($e = 3,0-3,7$) в теле поковки (рис. 4, а; кривая 1). Более того, деформации распределяются равномерно в объеме

(рис. 4, б). Максимальная неравномерность их распределения составляет $\Delta e = 0,5$ единиц. Ковка до заданных размеров не приводит к образованию зажима между цапфой и телом заготовки. Однако в процессе ковки образуется волнистая поверхность поковки, которая будет требовать дополнительной ее правки для снижения припуска на механическую обработку. Уменьшить образование поверхностной волнистости можно также за счет уменьшения величины обжатия за нажим пресса.

Увеличение ширины деформирующей плоской площадки бойка со скосами до $b/V = 0,5$ (рис. 4, а; кривая 2) способствует сохранению высокой неравномерности распределения деформаций по сечению поковки. Максимальные деформации сосредотачиваются на глубине примерно $0,2 R$ от поверхности поковки.



1 – $b/V = 0,3$; 2 – $b/V = 0,5$; 3 – $b/V = 0,7$
а)



б)

Рис. 4. – Распределение логарифмических деформаций при ковке бойками с углом скосов $\beta = 30^\circ$ по радиусу заготовки (а) и продольному сечению поковки при $b/V = 0,3$ (б)

При большей ширине деформирующей плоской площадки ($b/V = 0,7$) уровень деформаций на поверхности снижается за счет увеличения действия сил трения, максимальные деформации локализуются в слое, равном $0,2-0,5$ радиуса поковки (рис. 4, а; кривая 3).

Неравномерность распределения деформаций снижается до $\Delta\epsilon = 0,15$ единиц. Для данной схемыковки, в отличие от предыдущих вариантов, зажимы на поверхности поковки не образуются.

Для угла скоса бойков в 30° уровень накопленных деформаций в осевой и поверхностной зоне примерно одинаков и составляет 2,6–2,9 единиц. Отставание поверхностной зоны заготовки от средних слоев по уровню деформаций вызвано действием контактных сил трения и охлаждением поверхности. Неравномерность распределения деформаций снижается с уменьшением длины плоского рабочего участка бойка (рис. 4, б).

После анализа исследованных схемковки поковок бойками со скосами можно сделать вывод, что эффективным вариантомковки укороченных слитков являетсяковка бойками с углом скоса $\beta = 20\text{--}30^\circ$ и соотношением $b / B = 0,3\text{--}0,5$. В этом случае наблюдается равномерное распределение деформаций по сечению поковки (рис. 4, б).

Экспериментальная проверка результатов теоретического анализа. Теоретическое исследование МКЭ процессовковки укороченных слитков бойками позволило установить рациональную геометрию бойков со скосами, которые обеспечивают интенсивную вытяжку при протяжке и отсутствие наружных поверхностных дефектов (зажимов, утяжин, волнистости). Цель экспериментального исследования – проверить полученные теоретические результаты на свинцовых образцах.

Для исследования применялись цилиндрические заготовки с размерами $D \times L = 80 \times 40$ мм и цапфой $d = 20$ мм (рис. 5, а), которые деформировались в специальном штампе (рис. 6, а) с набором бойков со скосами (рис. 6, б). Штамп устанавливается на испытательную машину модели МС–200 усилием 200 кН, скорость деформирования 2 мм / с.

Подготовленные свинцовые образцы протягивались в бойках с углом скоса $\beta = 30^\circ$ и соотношением $b / B = 0,3$ как наиболее эффективные параметры инструмента, с точки зрения максимальной равномерности распределения деформаций, интенсивной вытяжки при протяжке. Деформирование осуществлялось поэтапно, с максимальным обжатием за проход 15 % от диаметра образца и величиной относительной подачи 0,5. На конечном этапе получилась поковка, имеющая в поперечном сечении форму многоугольника (см. рис. 5, б). Для данной геометрии инструмента в процессе протяжки на поверхности поковки не образуются зажимы, и металл течет интенсивно вдоль оси заготовки. По окончании процесса деформирования поковка имеет боковую поверхность, близкую к цилиндрической (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. – Заготовка до (а) и после протяжки (б) бойками со скосами

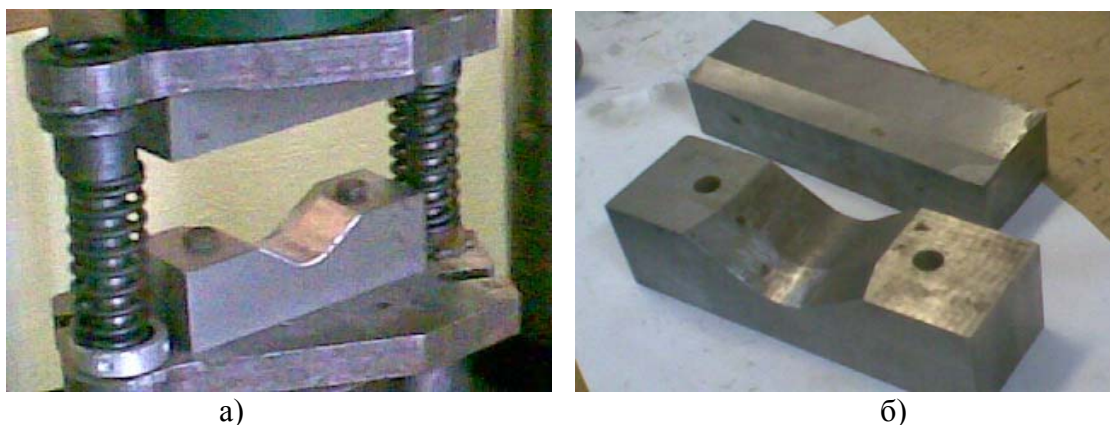


Рис. 6. – Штамп для деформирования (а) и бойки со скосами (б)

ВЫВОДЫ

С использованием установленной аналитической связи компонент напряжений со скоростями деформации и программы производилось исследование деформированного состояния металла заготовки в процессековки укороченных слитков с применением операции протяжки без осадки. Полученные результаты позволили установить, что интенсифицировать протяжку можно за счет использования бойков со скосами. В этом случае происходит более интенсивное течение металла в осевом направлении, что сокращает время изготовления поковок. При углах скоса бойков в 30° и узких деформирующих кромках происходит равномерное распределение деформаций в объеме поковки. Уменьшить образование поверхностных зажимов, наплывов, вмятин и волнистости боковой поверхности поковки можно за счет уменьшения величины обжатия. При этом происходит увеличение уровня пластических деформаций в осевой зоне с уменьшением неравномерности их распределения по сечению. Рациональной геометрией инструмента для интенсификации вытяжки при ковке укороченных слитков являются бойки с углом скосов $20\text{--}30^\circ$ и соотношением $b/B = 0,5\text{--}0,3$. Для гарантированного исключения складкообразования от наплывов металла на цапфу предложено выполнить конический переходной участок от тела слитка к прибыльной части с углом конусности $30\text{--}40^\circ$.

Экспериментальные исследования на свинцовых образцах подтверждают результаты КЭ моделирования, погрешность по формоизменению составляет 9–12 %, что подтвердило достоверность полученных теоретических результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин В. А. Современная ковочная индустрия мира / В. А. Тюрин // КШП. ОМД. – Москва, 2004. – № 12. – С. 37–41.
2. Применение способа осадки слитков кольцами в процессахковки валов / И. С. Алиев [и др.] // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 94–98. – ISSN 2076-2115.
3. Марков О. Е. Ресурсосберегающие технологические процессыковки крупных валов и плит : монография / О. Е. Марков, И. С. Алиев. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 324 с. – ISBN 978-966-379-583-6.
4. Дурынин В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с. : ил. – ISBN 5-93808-127-0.
5. Марков О. Е. Deform – 3d для конечно-элементного моделирования процессовковки крупных слитков / О. Е. Марков // Инженерные системы – 2011 : междунар. науч.-практич. конф., г. Москва, 5–8 апреля 2011 г. – М. : РУДН, 2011. – С. 30–31.
6. Марков О. Е. Установление аналитической связи между напряжениями и скоростями деформаций для моделирования процессов горячего деформирования / О. Е. Марков // КШП. ОМД. – Москва, 2012. – № 7. – С. 32–37.

Статья поступила в редакцию 27.11.2013 г.