

УДК 621.73

Василевский О. В.
Грушко А. В.
Кухарь В. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОКОВОК ТИПА ВАЛОВ ПРИ КОВКЕ В КОМБИНИРОВАННЫХ БОЙКАХ

Современное кузнечное производство позволяет получать широкую номенклатуру типоразмеров поковок. Значительная доля поковок по конфигурации представляет собой изделия с вытянутой осью, которые в дальнейшем используют для изготовления деталей валков, роликов, зубчатых валов и пр. Как правило, они подвергаются знакопеременным нагрузкам, работающим на излом вдоль оси. В связи с этим в поковках требуется получить направленную макроструктуру и мелкодисперсную микроструктуру, обеспечивающие улучшение механических свойств детали. В зависимости от размеров поковки и серийности производства применяют разнообразные способы изготовления. При мелкосерийном производстве и для получения уникальных крупных поковок применяют операцииковки на молотах, гидравлических прессах и радиально-обжимных машинах (РОМ). В настоящее время большую часть крупных поковок коуют на гидравлических ковочных прессах.

Термомеханические режимы пластической деформации при операциях кузнечной протяжки существенно влияют на качество получаемой поковки, которое можно оценить следующими показателями: состояние поверхности и геометрическая точность изделий, микроструктура и механические свойства поковок. Характеристики механических режимов деформации находятся в зависимости от многих факторов. В настоящее время проводится анализ и систематизация влияния исходных параметров, задаваемых при разработке технологического процесса [1–4], на качество получаемого конечного изделия. Важными характеристиками режимовковки, позволяющими интенсифицировать протяжку, являются режимы подачи и кантовок в сочетании с конфигурацией применяемого инструмента, которые позволяют добиться реализации эффекта макросдвиговых деформаций [3, 4].

Целью данного исследования является изучение влияния режимов подачи и кантовок на деформированное состояние заготовки в процессековки.

Данная задача является упругопластической, контактной, нелинейной, требующей учета больших перемещений и деформаций. В настоящее время наиболее перспективным методом решения таких задач является метод конечных элементов (МКЭ). Лидером среди программных пакетов, которые позволяют решать нелинейные задачи МКЭ и имеют реалистические математические модели материалов, является LS-DYNA.

Для анализа применяли модель трения по Кулону с определением контактных касательных напряжений по напряжениям текучести при сдвиге. Свойства деформируемой стали 25Х1М1Ф в горячем состоянии задавали в виде упругих констант изотропного материала и кривой течения с учетом скоростного упрочнения по Куперу-Саймонду.

Как в экспериментально-теоретических, так и в численных расчетах, при деформациях, существенно превышающих деформацию предела текучести, достаточную для большинства процессов обработки давлением точность дает степенная модель:

$$\sigma_i = A e_i^n \left(1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}_i}{c} \right]^P \right),$$

где A и n – эмпирические коэффициенты – модуль и показатель упрочнения материала;

σ_i , e_i – интенсивность напряжений, интенсивность деформаций соответственно;

$\dot{\epsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформаций;

c и P – коэффициенты Купера-Саймонда, учитывающие влияние скорости деформаций на напряжение текучести.

Предел текучести определяется программой автоматически, как пересечение прямолинейного упругого участка, задаваемого модулем Юнга, со степенной функцией:

$$\sigma_y = A \left(\frac{E}{A} \right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

Деформация, соответствующая пределу текучести:

$$e_y = \left(\frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{n-1}}.$$

Путем варьирования параметров моделирования определено, что свойства материала, в том числе в пределах изменения температурыковки, не оказывают существенного влияния на деформированное состояние заготовки. К таким свойствам относят: модуль нормальной упругости Юнга (E), коэффициент Пуассона (ν), кривая течения материала, зависимость напряжения течения от скорости деформации. На напряженное состояние указанные факторы оказывают существенное влияние, однако в данной работе напряженное состояние заготовки не исследовали. Таким образом, процесс считали изотермическим.

Для расчетов задавали усредненные механические характеристики, полученные на основе обработки литературных источников [5, 6]. В результате свойства материала заготовки задавали картой, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материала заготовки

E , МПа	ν	A , МПа	n	c , с ⁻¹	P
2×10^4	0,4	16,9	0,2	500	2

Моделировали протяжку заготовки комбинированными бойками. Верхний боек плоский, нижний – вырезной с радиусом выреза 300 мм. Заготовку принимали неподвижной, а бойки задавали как абсолютно жесткие тела, совершающие ковочные движения вокруг заготовки. При моделировании выбор оптимальных режимов пластической деформации осуществляли так, чтоб обеспечить выполнение требуемых показателей качества поковки с точки зрения механики процесса, к которым относят величину накопленных деформаций, равномерность распределения деформаций, отсутствие растягивающих напряжений, конечную форму заготовки. Проведем анализ данных показателей.

Величина накопленных деформаций. С увеличением степени минимальной накопленной деформации, получаемой при пластической деформации заготовки, улучшается проработка обрабатываемого материала, что особенно важно для поволоков, изготавливаемых из слитков. Разрушение заготовки во внимание не принимали из-за достаточно больших предельных деформаций при ковочных температурах.

Равномерность распределения деформаций. Следует отдавать предпочтение режимамковки, дающим более равномерную деформацию по сечению, которая непосредственно влияет на механические свойства металла. Равномерность распределения механических свойств обеспечивает значительное улучшение эксплуатационных характеристик детали.

Отсутствие растягивающих напряжений в пластической области на протяжении всего процессаковки. Данное условие позволяет обеспечить закрытие дефектов литейного происхождения и минимизировать вероятность трещинообразования в начале процесса пластической деформации.

Конечная форма заготовки. При выборе оптимального режимаковки необходимо учитывать конечную форму получаемой заготовки и стремиться к обеспечению поперечного сечения максимально приближенного к кругу.

Были промоделированы 9 режимовковки заготовки из стали 25X1M1Ф от диаметра 550 мм до диаметра 350 мм. При моделировании технологического процесса варьировали следующими факторами: величины обжатий принимали 50 мм (9 %), 66 мм (12 %), 100 мм (18 %); углы кантовок принимали 30 °, 60 °, 90 °.

Режим ковки для краткости зашифрован в следующем виде: первая цифра – обжим на один проход (в мм), вторая – угол кантовки (в градусах). Исследованные режимы ковки и их шифры представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы ковки и их шифры

Шифр режима ковки	Обжатие		Количество проходов	Количество обжатий на подачу	Общее количество обжатий на сечение	Угол кантовки, в градусах
	мм	%				
50_30	50	9	4	12	48	30
50_60	50	9	4	12	48	60
50_90	50	9	4	12	48	90
66_30	66	12	3	12	36	30
66_60	66	12	3	12	36	60
66_90	66	12	3	12	36	90
100_30	100	18	2	12	24	30
100_60	100	18	2	12	24	60
100_90	100	18	2	12	24	90

После моделирования режимов ковки определяли накопленные деформации, проводили обработку и анализ данных. Для измерения деформаций проводили 7 концентрических окружностей в исследуемом сечении заготовки (рис. 1). Величину среднеарифметической деформации определяли на каждой окружности в 12-ти равноудаленных от центра точках.

Анализ полученных данных позволил установить, что распределение средней деформации от центра заготовки к периферии соответствует линейному закону при всех промоделированных режимах ковки (рис. 2) с корреляцией, близкой к 1. Таким образом, распределение интенсивностей деформаций подчиняется закономерности:

$$e_i = e_{i\max} - a \cdot \rho, \quad (1)$$

где $e_{i\max}$ – максимальная деформация заготовки (наблюдается на оси);

a – угловой коэффициент уменьшения деформаций к периферии;

ρ – радиус-вектор от центра заготовки до исследуемой точки.

Расчетные значения угловых коэффициентов, согласно выражению (1), для исследованных режимов ковки приведены в табл. 3.

Минимальная деформация в сечении наблюдается на поверхности заготовки и определяется выражением:

$$e_{i\min} = e_{i\max} - a \cdot 175, \quad (2)$$

где 175 мм – половина диаметра прокованной заготовки.

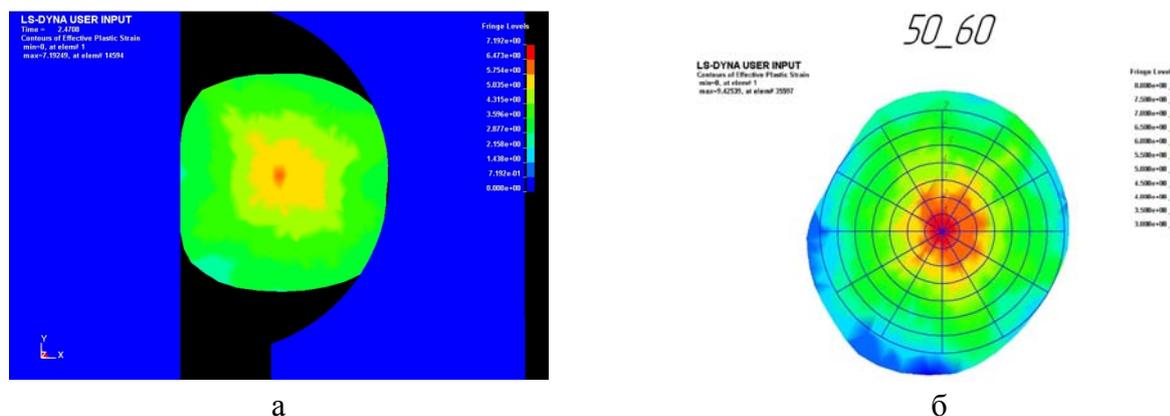


Рис. 1. Схема деформаций по режиму 100_90 (а) и измерения деформаций по режиму 50_60 с концентрическими окружностями (б)

Таблица 3

Расчетные значения угловых коэффициентов

Шифр режимаковки	$e_{i\max}$	a	Корреляция (χ^2)
50_30	$6,44 \pm 0,053$	$0,01357 \pm 5,05E-4$	0,99
50_60	$8,04 \pm 0,055$	$0,02099 \pm 5,41E-4$	0,99
50_90	$7,03 \pm 0,073$	$0,02367 \pm 6,93E-4$	0,99
66_30	$6,08 \pm 0,063$	$0,01452 \pm 5,99E-4$	0,99
66_60	$7,10 \pm 0,05$	$0,02083 \pm 4,81E-4$	0,99
66_90	$7,54 \pm 0,05$	$0,02083 \pm 4,81E-4$	0,99
100_30	$5,17 \pm 0,052$	$0,01262 \pm 4,95E-4$	0,99
100_60	$6,46 \pm 0,02$	$0,01967 \pm 1,92E-4$	0,99
100_90	$6,39 \pm 0,12$	$0,01881 \pm 0,0011$	0,99

Средняя деформация по сечению заготовки, при допущении её круглой формы поперечного сечения с $d = 2r = 350$ мм:

$$e_{icp} = \frac{1}{A} \int_A e_i dA = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^{2\pi} \int_0^r (e_{i\max} - a \cdot \rho) \rho d\rho d\varphi = e_{i\max} - \frac{2}{3} a \cdot r = e_{i\max} - 116,7a. \quad (3)$$

Неравномерность распределения деформаций оценивали величиной:

$$\Delta = e_{i\min} / e_{icp}. \quad (4)$$

Выбор такой зависимости связан с тем, что минимальная и средняя деформации важны для оценки качества поковки. Наиболее благоприятный случай соответствует $\Delta = 1$, однако он является практически недостижимым.

В табл. 4 представлены указанные характеристики заготовки, позволяющие определить выбор рационального режимаковки.

Анализ и обобщение данных табл. 4 показывает, что увеличение степени обжатия в исследуемых режимахковки от минимального к максимальному приводит к ухудшению проработки поперечного сечения заготовки. Наблюдается уменьшение величин минимальных и средних накопленных деформаций. При ковке с минимальным углом кантовки заготовки, получаемое поперечное сечение максимально не соответствует кругу, также наблюдается наименьшая неравномерность распределения деформаций по поперечному сечению.

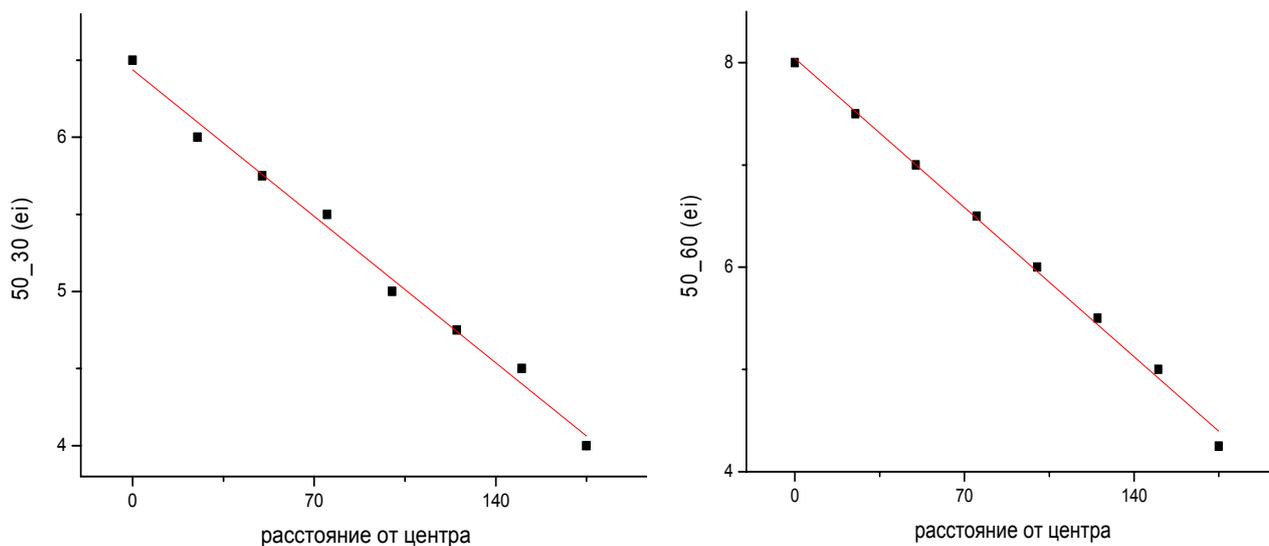


Рис. 2. Пример распределения средней интенсивности деформаций ($e_i = e_{icp}$) по радиусу заготовки (расстояние от центра в мм)

Таблица 4

Характеристики деформированного состояния заготовки

Шифр режимаковки	$e_{i\max}$	e_{icp}	$e_{i\min}$	$e_{i\max}/e_{icp}$	$e_{i\min}/e_{icp}$	Оценка геометрии сечения по 5-ти бальной шкале
50_30	6,44	4,85	4,07	0,63	0,84	3
50_60	8,04	5,58	4,37	0,54	0,78	4
50_90	7,03	4,25	2,89	0,41	0,68	5
66_30	6,08	4,38	3,54	0,58	0,81	3
66_60	7,10	4,66	3,45	0,49	0,74	4
66_90	7,54	5,10	3,89	0,52	0,76	4
100_30	5,17	3,69	2,96	0,57	0,80	3
100_60	6,46	4,15	3,02	0,47	0,73	4
100_90	6,39	4,18	3,10	0,48	0,74	4

Ковка заготовки с углом кантовки равным 90° позволяет получить поперечное сечение с геометрической формой, которая максимально соответствует кругу. Все промоделированные режимыковки обеспечивают отсутствие растягивающих напряжений, превышающих предел текучести.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для практического применения можно рекомендовать режимы с углами кантовки 60° и 90° при обжатиях за 3 и более проходов. Наиболее оптимальные параметры для исследуемых процессов протяжки, обеспечивающие получение качественной заготовки с точки зрения наибольшей средней накопленной деформации, высокой степени равномерности деформации и с достаточной точностью геометрии поперечного сечения, соответствуют режиму 50_60.

ЛИТЕРАТУРА

1. George Ellwood Dieter. *Handbook of workability and process design* / George Ellwood Dieter, Howard A. Kuhn, S. L. Semiatin. – ASM International, 2003. – 414 p.
2. George Krauss. *Deformation, processing, and structure* / George Krauss. – ASM. : St. Louis, 1984. – 524 p.
3. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
4. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 5. – С. 27–29.
5. Третьяков А. В. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением* / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
6. Бернштейн М. Л. *Структура и механические свойства металлов* / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М. : Металлургия, 1970. – 172 с.

Василевский О. В. – зам нач. цеха ПАО «ММК им. Ильича»;

Грушко А. В. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Кухарь В. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ, докторант НМетАУ.

ПАО «ММК им. Ильича» – ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», г. Мариуполь;

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница;

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь;

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru