

PACS: 81.40.Lm, 81.40.-z

С.В. Мирошниченко

УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗАГОТОВОК ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ РЕВЕРСИВНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 года

Представлены результаты моделирования процесса реверсивного выдавливания с варьированием конструктивных параметров обработки в системе конечно-элементного комплекса Deform-2D. Методом планирования эксперимента получены аналитические соотношения связи между конструктивными параметрами, влияющими на формирование деформированного состояния материала, приводящего к образованию структурного композита типа сердечник–оболочка, и деформационными критериями, определяющими эту возможность.

Ключевые слова: реверсивное выдавливание, плановый эксперимент, моделирование, архитектурный материал, деформированное состояние, деформационные критерии

Накопленный опыт использования интенсивного пластического деформирования (ИПД) для достижения в металлах и сплавах субмикроструктурных (СМК) состояний позволил перейти к разработке технологических приемов, нацеленных на создание мультимасштабных архитектурных материалов с градиентной структурой. К примерам таких решений можно отнести комбинацию метода High Pressure Torsion с химико-термической обработкой для формирования слоистых материалов [1], получение коаксиальной двухкомпонентной структуры с СМК-оболочкой и крупнокристаллической сердцевиной методом винтовой экструзии [2]. Теоретическая возможность формирования внутренней архитектуры с обратной комбинацией составляющих (СМК-сердечник в сочетании с крупнокристаллической оболочкой) с использованием метода многоциклового реверсивного выдавливания показана на основе математического моделирования в конечно-элементном пакете Deform-2D [3].

Для разработки технологии получения материалов двухкомпонентного типа реверсивным выдавливанием требуется выбор рациональной технологической схемы, технологических параметров обработки и конструктивных параметров заготовки и инструмента, которые оказывают решающее влияние на создание деформированного состояния, определяющего изменение структуры и свойств материала.

Определяя задачу данных исследований, будем придерживаться стратегии формирования в материале двухкомпонентной архитектуры с однородным СМК-компонентом. Здесь встает очередная задача определения параметров, характеризующих соответствующее такой структуре деформированное состояние, и факторов, влияющих на его достижение.

В качестве исследуемых параметров приняты следующие деформационные характеристики:

- минимальная величина накопленной деформации в приосевой зоне заготовки ε_{\min} – параметр, контролирующий необходимый уровень достижения СМК-состояний;

- отношение максимального значения накопленной деформации, измеренной в приосевой области заготовки ($r_0 < 0.3r$), к ее величине на внешнем радиусе r заготовки: $k_\varepsilon = \varepsilon_{\max}^{r_0 < 0.3r} / \varepsilon^r$;

- показатель равномерности распределения интенсивности деформаций по поперечному сечению сердцевины заготовки ($0 \leq r_0 \leq 0.3r$), определяемый отношением стандартного отклонения накопленных деформаций к их средней величине: $e_S = S/e_{\text{mean}}$.

Комплекс факторов, влияющих на указанные показатели, зависит от диаметра полости d , формируемой при выдавливании, высоты заготовки H и глубины внедрения Δh внутреннего пуансона (рис. 1). В этой связи за основные факторы влияния приняты:

- относительная высота заготовки H/D ;
- относительная глубина очага деформации $\Delta h/H$;
- относительный диаметр очага деформации d/D .

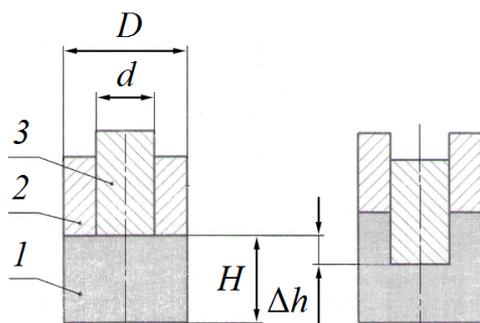


Рис. 1. Геометрические параметры, используемые в эксперименте: 1 – деформируемая заготовка; 2, 3 – соответственно внешний и внутренний пуансоны

Целью данного исследования является установление количественной связи между конструктивными параметрами процесса и характеристиками деформированного состояния.

Для реализации поставленной цели проведен полный факторный эксперимент типа 2^3 , позволяющий установить степень влияния исследуемых факторов и их комплексное воздействие на изучаемые параметры [4]. Изменение факторов осуществляли на трех уровнях (табл. 1). Основные уровни факторов и интервалы их варьирования выбирали, исходя из реальных для лабораторных исследований изменений их величины.

В качестве математической модели взята функция вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j,$$

где y – параметр, подлежащий изучению, b_0 – свободный член уравнения, $b_{i,j}$ – регрессионные коэффициенты при полиноме, $x_{i,j}$ – значения факторных признаков в натуральном масштабе.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	$x_1 (H/D)$	$x_2 (d/D)$	$x_3 (\Delta h/H)$
Основной уровень	1	0.5	0.5
Интервал варьирования	0.5	0.2	0.167
Верхний уровень	1.5	0.9	0.333
Нижний уровень	0.5	0.7	0.667

Таблица 2

План численного эксперимента и значения основных характеристик деформированного состояния заготовки после четырех циклов реверсивного выдавливания

Номер расчета	x_1	x_2	x_3	ϵ_{\min}	e_S	k_ϵ
1	0.5	0.5	1/3	3.26	0.35	4.44
2	0.5	0.7	1/2	5.51	0.2	1.7
3	0.5	0.9	2/3	10.63	0.16	1.82
4	1.0	0.7	1/3	4.12	0.24	2.18
5	1.0	0.9	1/2	7.15	0.21	1.23
6	1.0	0.5	2/3	8.57	0.21	5.75
7	1.5	0.9	1/3	4.09	0.55	1.01
8	1.5	0.5	1/2	7.8	0.2	7.88
9	1.5	0.7	2/3	13.32	0.16	3.39

Согласно плану эксперимента (табл. 2) выполнено девять расчетов четырех циклов реверсивного выдавливания в среде комплекса Deform-2D. Приведенные на рис. 2 поля деформаций Мизеса ϵ_{eff} , полученные в результате решения девяти модельных задач, дают качественное представление об их уровне и градиенте распределения в радиальном направлении. Из рисунка

видно, что решение задачи 3 свидетельствует о сравнительно однородном распределении деформаций высокой интенсивности, а решения задач 1, 6, 8, 9 представляют удовлетворительные результаты по формированию незначительного объема очага интенсивной деформации, занимающего приосевую часть заготовки. Промежуточное положение зоны интенсивного сгущения сетки, характерное для вариантов 2, 4, 5, 7, может рассматриваться в аспекте получения трехслойной композиции с сильнодеформированной кольцевой областью, ограниченной слабдеформированными зонами. Эта особенность процесса реверсивного выдавливания позволит на основе полученной математической модели связи конструктивных параметров с показателями деформированного состояния смещать зону локализации деформаций, изменять ее глубину и интенсивность в зависимости от поставленной задачи, регулируя геометрию заготовки и инструмента.

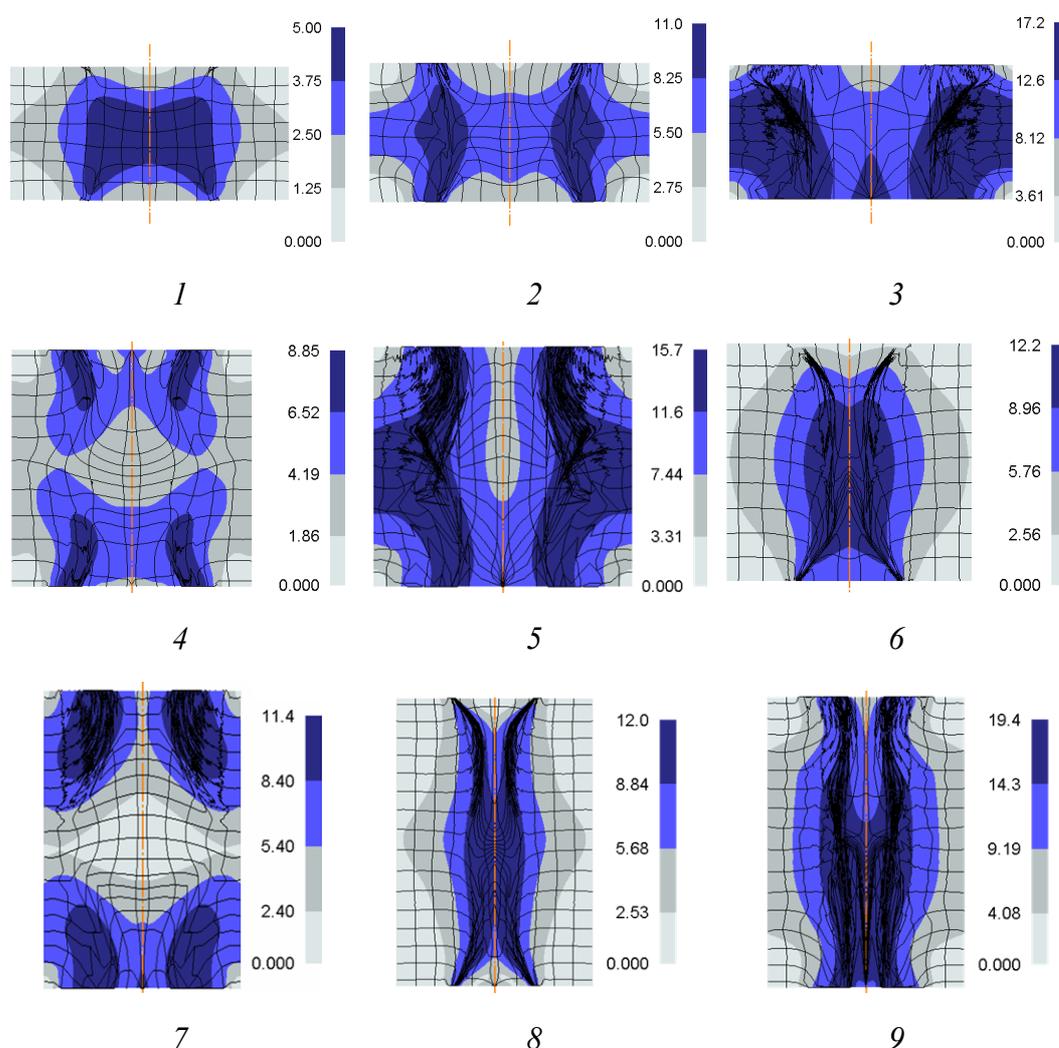


Рис. 2. Поля деформаций Мизеса ϵ_{eff} в продольном сечении заготовки после четырех циклов реверсивного выдавливания, полученные в результате решения девяти модельных задач: 1–9 – номер решений по плану эксперимента

Количественная оценка деформированного состояния представлена на рис. 3. Так как в большинстве вариантов неоднородность деформаций по высоте заготовки весьма существенна, для каждого эксперимента рассчитаны усредненные значения накопленной деформации, распределенной вдоль радиуса r на пяти уровнях ординаты продольного сечения заготовки: $z = (0.1, 0.3, \dots, 0.9)H$.

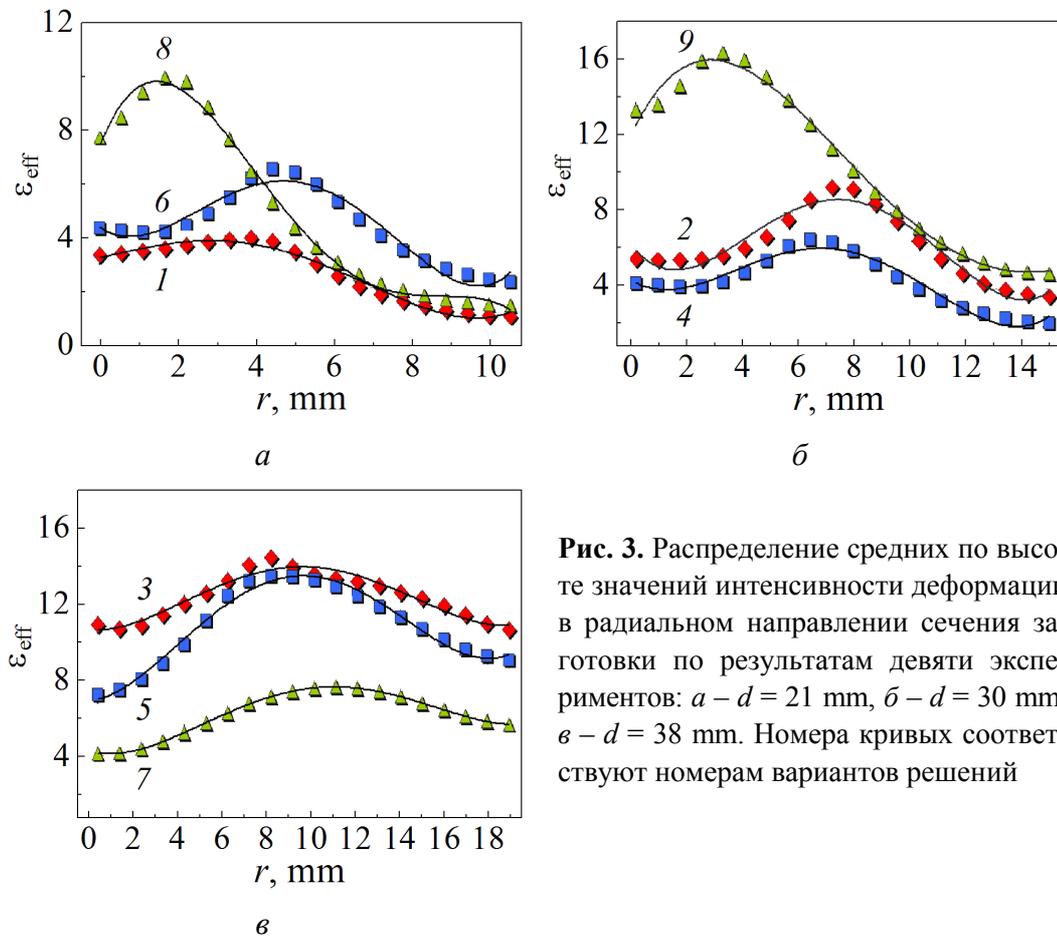


Рис. 3. Распределение средних по высоте значений интенсивности деформации в радиальном направлении сечения заготовки по результатам девяти экспериментов: $a - d = 21$ мм, $б - d = 30$ мм, $в - d = 38$ мм. Номера кривых соответствуют номерам вариантов решений

Математические модели влияния конструктивных параметров процесса на характеристики деформированного состояния получены в результате проведенного регрессионного анализа:

$$\varepsilon_{\min} = 10.35 - 0.59 \frac{H}{D} - 20.27 \frac{d}{D} - 15.6 \frac{\Delta h}{H} + 1.4 \frac{H}{D} \frac{d}{D} + 44 \frac{d}{D} \frac{\Delta h}{H} + 6 \frac{H}{D} \frac{\Delta h}{H}, \quad (1)$$

$$e_S = 1.36 - 0.2 \frac{H}{D} - 2.96 \frac{d}{D} + 0.31 \frac{\Delta h}{H} + 1.74 \frac{H}{D} \frac{d}{D} + 2 \frac{d}{D} \frac{\Delta h}{H} - 1.8 \frac{H}{D} \frac{\Delta h}{H}, \quad (2)$$

$$k_\varepsilon = 12 + 10.45 \frac{H}{D} - 26.76 \frac{d}{D} - 5.34 \frac{\Delta h}{H} - 2.25 \frac{H}{D} \frac{d}{D} + 29.54 \frac{d}{D} \frac{\Delta h}{H} - 12.87 \frac{H}{D} \frac{\Delta h}{H}. \quad (3)$$

Анализ коэффициентов уравнений (1)–(3) показал, что с уменьшением относительного диаметра пуансона и относительной глубины его внедрения уровень накопленных деформаций в приосевой области заготовки понижается. Однако следует отметить, что значимым оказался сложный эффект их парного взаимодействия, который свидетельствует о возможном повышении уровня накопленных деформаций при одновременном увеличении факторов, характеризующих глубину выдавливаемой полости и соотношения диаметров пуансонов. Идентичное влияние эти факторы оказывают на критерий градиента деформации в радиальном направлении сечения заготовки. Обратное влияние на показатель однородности демонстрируют парные комбинации относительной высоты заготовки с другими факторами при отклонении H/D от основного уровня.

Для определения адекватности полученных зависимостей с достоверностью аппроксимаций R^2 была произведена проверка с помощью критерия Фишера F_{calc} . В нашем случае применительно к уравнениям:

- (1) – $R^2 = 0.99$, $F_{\text{calc}} = 31.7$, $\Delta = 3.9\%$;
- (2) – $R^2 = 0.99$, $F_{\text{calc}} = 46.7$, $\Delta = 4.3\%$;
- (3) – $R^2 = 0.97$, $F_{\text{calc}} = 11.9$, $\Delta = 11.5\%$.

Здесь значения Δ указывают на среднюю ошибку расчета каждого параметра. Так как $F_{\text{calc}} > F_{\text{table}} = 5.59$ и $\Delta < 13\%$ [4], можно считать, что полученные модели адекватны, и их можно использовать как интерполяционные формулы для определения величин ε_{min} , e_S и k_ε .

По моделям (1)–(3) построены поверхности, позволяющие наглядно продемонстрировать влияние безразмерных факторов на исследуемые деформационные характеристики (рис. 4).

Результаты, представленные на рис. 4,а, подтверждают, что для достижения наибольшего уровня деформации в приосевой зоне заготовки наиболее значимым является взаимодействие факторов, характеризующих глубину выдавливаемой полости и соотношение диаметров пуансонов: при максимальном значении относительного хода пуансона $\Delta h/H$ увеличение соотношения диаметров d/D повышает показатель ε_{min} , и вклад относительной высоты заготовки H/D несколько усиливается. Видны существенные различия в силе влияния на показатель однородности деформаций как отдельных факторов, так и их комбинации (рис. 4,б). Так, при равенстве высоты и диаметра заготовки влияние $\Delta h/H$ и d/D на однородность деформации малозаметно, а при отклонении H/D в сторону увеличения или уменьшения эти факторы оказывают противоположное воздействие на показатель e_S . Для показателя градиента распределения деформации k_ε (рис. 4,в) роль факторов d/D и $\Delta h/H$ с увеличением высоты исходной заготовки растет более интенсивно.

В соответствии с изложенным выше и по аналогии с методикой работы [5], с помощью выбранных критериев деформированного состояния контролировались условия получения двухкомпонентной композиции СМК-сердцевины–крупнокристаллическая оболочка с однородной СМК-составляющей:

1. Стремление уровня интенсивности деформаций по сечению сердцевины заготовки к максимальной величине: $\epsilon_{\min} \rightarrow \max$. Выполнение критерия обеспечит необходимый уровень накопленных деформаций для формирования СМК-структуры в приосевой области.

2. Достижение наибольшей величины показателя градиента деформаций: $k_{\epsilon} \rightarrow \max$. Данный критерий обеспечит необходимую степень градиентности деформаций по радиусу заготовки для формирования структурной комбинации из элементов субмикро- и микроуровней.

3. Максимальная равномерность распределения интенсивности напряжений по сечению сердцевины: $e_s \rightarrow \min$. Выполнение критерия обеспечит однородность ожидаемой структуры и свойств в этой зоне заготовки.

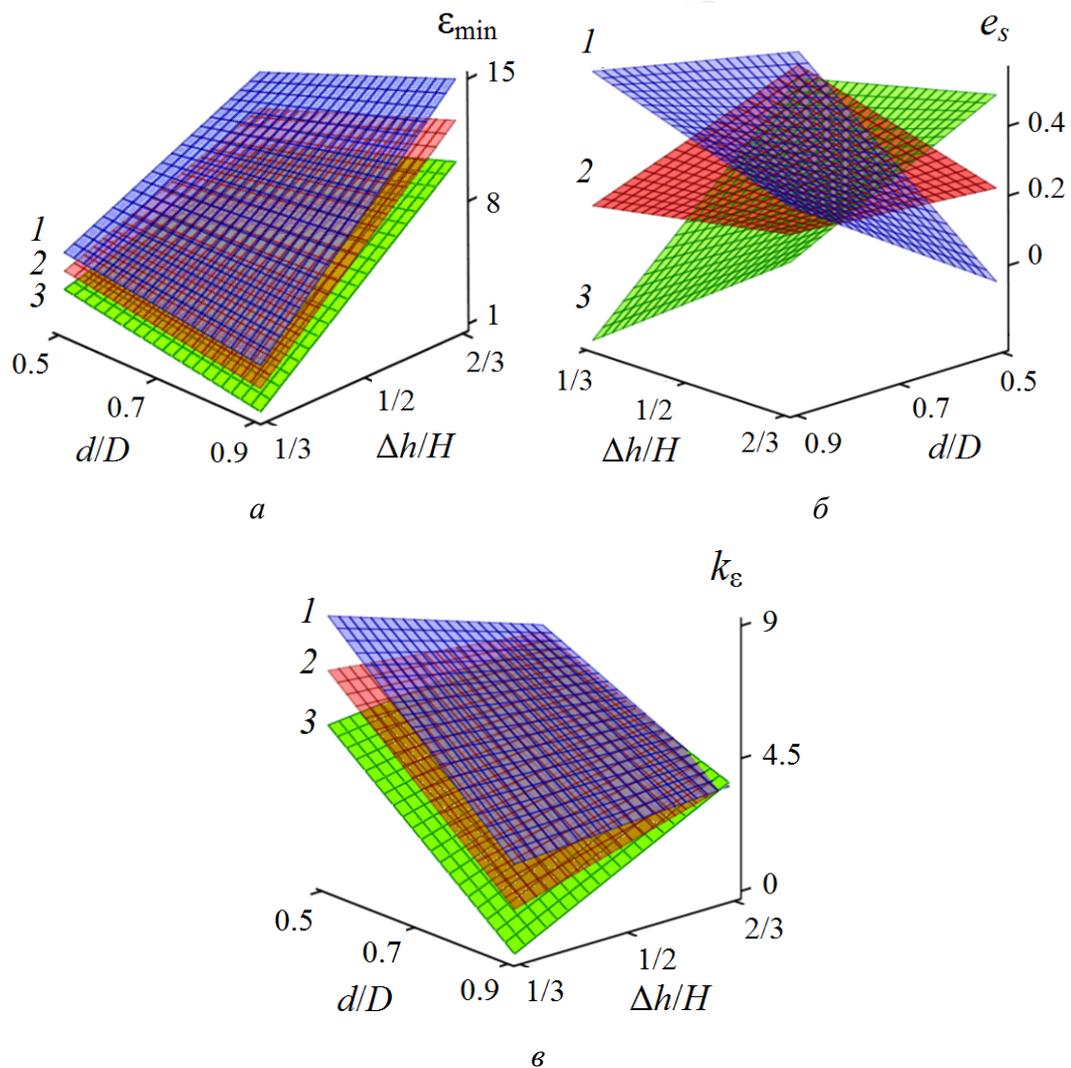


Рис. 4. Графики зависимостей основных деформационных критериев от безразмерных факторов ($1 - H/D = 1.5$; $2 - 1$; $3 - 0.5$): *a*, *б* – соответственно минимальная величина деформации и однородность ее распределения в приосевой зоне заготовки, *в* – распределение деформации в радиальном направлении

Обобщая данные рис. 4, можно сделать вывод, что максимальный градиент деформации достигается за счет уменьшения диаметра внутреннего пуансона по сравнению с диаметром заготовки, при этом глубина деформирования должна составлять $2/3$ исходной высоты заготовки. При этих же сочетаниях параметров достигается высокий уровень накопленной деформации и ее однородности в приосевой зоне при условии использования высоких ($H/D = 1.5$) заготовок. Отсюда следует, что требованиям формирования мультимасштабной градиентной структуры с однородным внутренним слоем наиболее соответствуют такие параметры деформирования: $H/D > 1$, $\Delta h/H = 0.7$, $d/D \leq 0.5$.

1. Ji Yun Kang, Jung Gi Kim, Hyo Wook Park, Hyoung Seop Kim, www.nature.com/scientificreports/2016.
2. О.В. Прокофьева, Д.В. Прилепо, Г.Д. Бокучава, А.Х. Исламов, А.Н. Сапронов, А.С. Дорошкевич, ФТВД **28**, № 1, 13 (2018).
3. О.В. Прокофьева, С.В. Мирошниченко, Д.В. Прилепо, А.Н. Сапронов, Вестник Луганского национального университета им. В. Даля № 2 (4), ч. 1, 219 (2017).
4. А.А. Спиридонов, Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов, Машиностроение, Москва (1982).
5. М.П. Барышников, Д.Г. Емалева, А.С. Кузнецова, А.В. Мохнаткин, Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. трудов, В.М. Салганик (ред.), Магнитог. гос. техн. ун-т, Магнитогорск (2009), с. 253–258.

S.V. Miroshnichenko

CONTROL OF THE STRAINED STATE OF THE BILLETS IN THE COURSE OF MULTI-CYCLES REVERSE EXTRUSION

The results of simulation of reverse extrusion with varying the design parameters of processing by using software finite-element complex Deform-2D are presented in the article. By the method of planning the experiment, analytical relationships have been obtained between the design parameters affecting the creation of the strained state of the material resulting in formation of a shell-core composite structures and deformation criteria that determine this possibility.

Keywords: reverse extrusion, planned experiment, simulation, architectural material, strain state, effective strain, strain criteria

Fig. 1. Geometric parameters used in the experiment: 1 – billet; 2, 3 – outer and inner plunger, respectively

Fig. 2. Fields of von Mises strain ε_{eff} over the longitudinal section of the billet after four reverse extrusion cycles: 1–9 – number of solution according to the planning of the experiment

Fig. 3. Distribution of mean-height values of the strain intensity in the radial direction of the billet cross section based on the results of nine experiments: $a - d = 21$ mm, $\bar{\sigma} - d = 30$ mm, $\sigma - d = 38$ mm. The numbers of the curves correspond to the variants of solutions

Fig. 4. Dimensionless factor dependencies of the basic deformation criteria ($1 - H/D = 1.5$; $2 - 1$; $3 - 0.5$): a , $\bar{\sigma}$ – the minimal strain and its homogeneity at paraxial zone of the billet, respectively, σ – strain distribution in the radial direction