

PACS: 81.40.Lm, 81.40.-z

С.В. Мирошниченко

## ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ. ЧАСТЬ I. ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ

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

Статья поступила в редакцию 19 июля 2019 года

*Приведены результаты моделирования процесса свободного реверсивного выдавливания. Показаны зоны формирования видимых дефектов и описаны причины их возникновения. Приведено обоснование выбора величины противодействия как фактора, обеспечивающего формирование системы напряжений, препятствующей зарождению дефектов.*

**Ключевые слова:** реверсивное выдавливание, дефекты, противодействие, моделирование, поля напряжений, координатная сетка

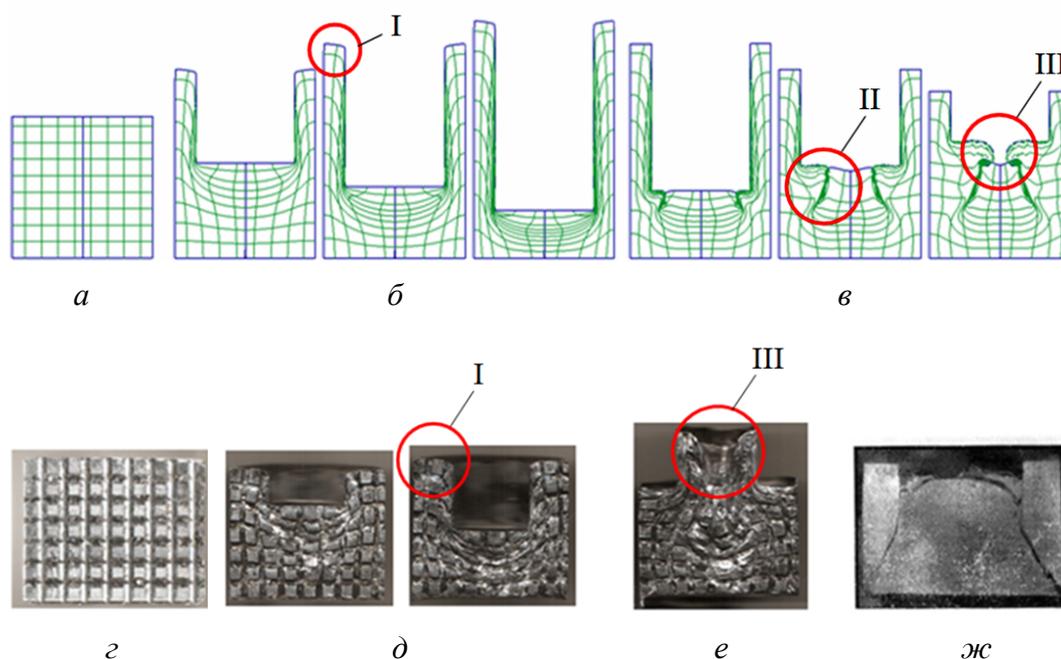
Численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) процесса реверсивного выдавливания [1] показал характерную для схем обратного выдавливания неравномерность напряженного состояния, проявляющуюся в формировании застойной зоны и зоны интенсивной деформации [2,3]. Граница раздела этих областей является зоной концентрации напряжений, действие которых усиливается на последующих стадиях деформации и является причиной зарождения и развития дефектов [4–8].

Эффективным методом залечивания дефектов и повышения пластичности металла является деформирование в условиях всестороннего сжатия [7], созданного противодействием. Однако, задавая его величину, следует учитывать неизбежное возрастание энергосиловых затрат на деформирование, что негативно сказывается на технико-экономических показателях процесса в целом. Поэтому важно установить диапазон значений противодействия, необходимого и достаточного для обеспечения соответствующего НДС, служащего основой достижения в материале требуемого уровня технологической пластичности в процессе деформации. Для выявления особенностей НДС заготовки, возникающего при реверсивном выдавливании с противодействием, и определения нижней границы его уровня был проанализирован процесс свободного деформирования (без использования противодействия).

Этим определяется цель работы, посвященной теоретическому исследованию НДС заготовки при свободном реверсивном выдавливании с эксперимен-

тальной проверкой его результатов в лабораторных условиях и установлению на основе полученных данных противодействия, обеспечивающего формирование системы напряжений, повышающей деформируемость материала.

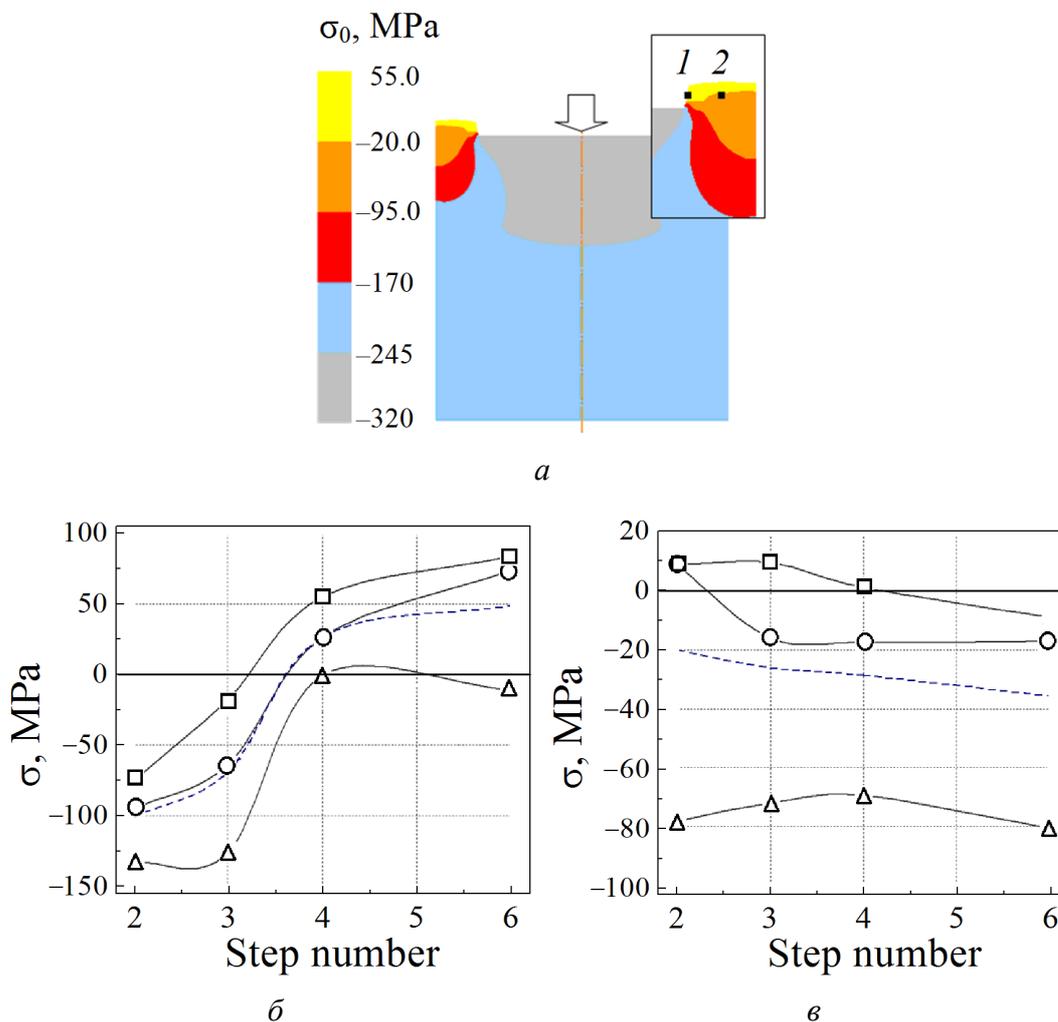
Теоретические исследования включали компьютерное моделирование одного цикла процесса с применением конечно-элементного комплекса Deform 2D. Описание используемой математической модели и условия выполнения расчетов приведены в [1]. При этом нагрузку от противодействия  $P_{b,p}$  в расчетной схеме процесса принимали равной нулю. Характер пластического течения модели заготовки по шагам каждого этапа деформирования изучали по изменению координатной сетки (рис. 1,а).



**Рис. 1.** Формирование дефектов (I, II, III) на этапах численного (а–в) и физического (z–e) экспериментов: а, z – исходное состояние; б, d – этап выдавливания; в, e – этап реверсирования; ж – появление трещины при реверсировании заготовки в эксперименте со сплавом AZ31 по данным [9]

Натурный эксперимент проводили на специально сконструированной установке, включающей контейнер, внутренний и внешний пуансоны. Картины течения металла получены с помощью метода делительных сеток. Для этого использовали заготовку из сплава АД1, разрезанную по плоскости меридионального сечения, на одну из частей которой фрезерованием была нанесена делительная сетка (рис. 1,з). Сначала заготовку продавливали внутренним пуансоном и дважды извлекали для фиксации делительной сетки. Затем на заготовку воздействовали внешним пуансоном до момента затекания металла в его внутреннюю полость (рис. 1,д). Искажение делительной сетки, полученной при физическом и виртуальном экспериментах, демонстрирует идентичность картин деформированного состояния.

На рис. 1 видны две характерные зоны формирования дефектов типа отклонений формы. Искажение в зоне I (рис. 1,б,д), типичное для свободного обратного выдавливания, наблюдалось в ряде экспериментальных и теоретических работ по изучению пластического течения металла в данном процессе [2,8,10,11]. Этот дефект проявляется на первых шагах деформирования и объясняется неравномерной деформацией, вызванной скачкообразным изменением компонент тензора напряжений и их направлений при прохождении материальных частиц через зону разворота течения металла (рис. 2).



**Рис. 2.** Поле гидростатического напряжения  $\sigma_0$  (---) на 6-м шаге деформирования (а, на вставке обозначены контрольные точки 1, 2) и изменение главных напряжений  $\sigma_1$  ( $\square$ ),  $\sigma_2$  ( $\circ$ ),  $\sigma_3$  ( $\Delta$ ) в контрольных точках 1 (б) и 2 (в) по шагам первого полуцикла

Появление складок в зоне II (рис. 1,в) при реверсировании обусловлено усилением неоднородности деформированного состояния, образованного на первом этапе, что является причиной нарушения идентичности условий течения в соседних областях материала и проявляется образованием дефекта III в виде воронки (рис. 1,е). Различие условий протекания деформации со-

проводится накоплением дополнительных напряжений вплоть до появления растягивающих напряжений, существенное влияние которых на зарождение и развитие дефектов показано в работах [12,13].

Картины распределения компонент тензора напряжений на этапе реверсирования (рис. 3) демонстрируют наличие в центральной зоне заготовки растягивающих касательных и нормальных напряжений, действующих в осевом направлении. Задачу их устранения можно решить, перераспределив напряжения в объеме материала за счет увеличения гидростатической составляющей напряжения путем приложения к выходному каналу противодействия  $P_{b.p.}$ . В этом случае по всему объему создаются условия всестороннего неравномерного сжатия (рис. 4,II,з). Для создания таких условий на имеющуюся схему разноименных главных напряжений (рис. 4,I,з) необходимо наложить отрицательный шаровой тензор такой величины, чтобы компенсировать растягивающие напряжения  $\sigma_1$ .

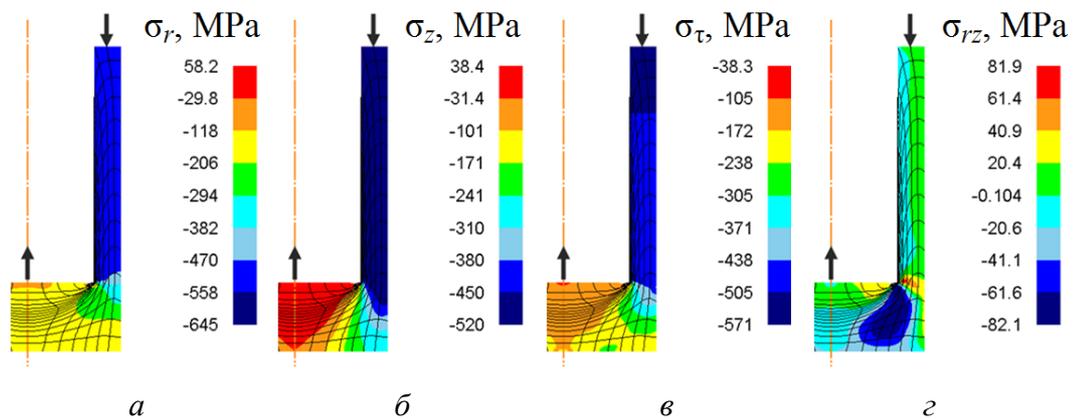
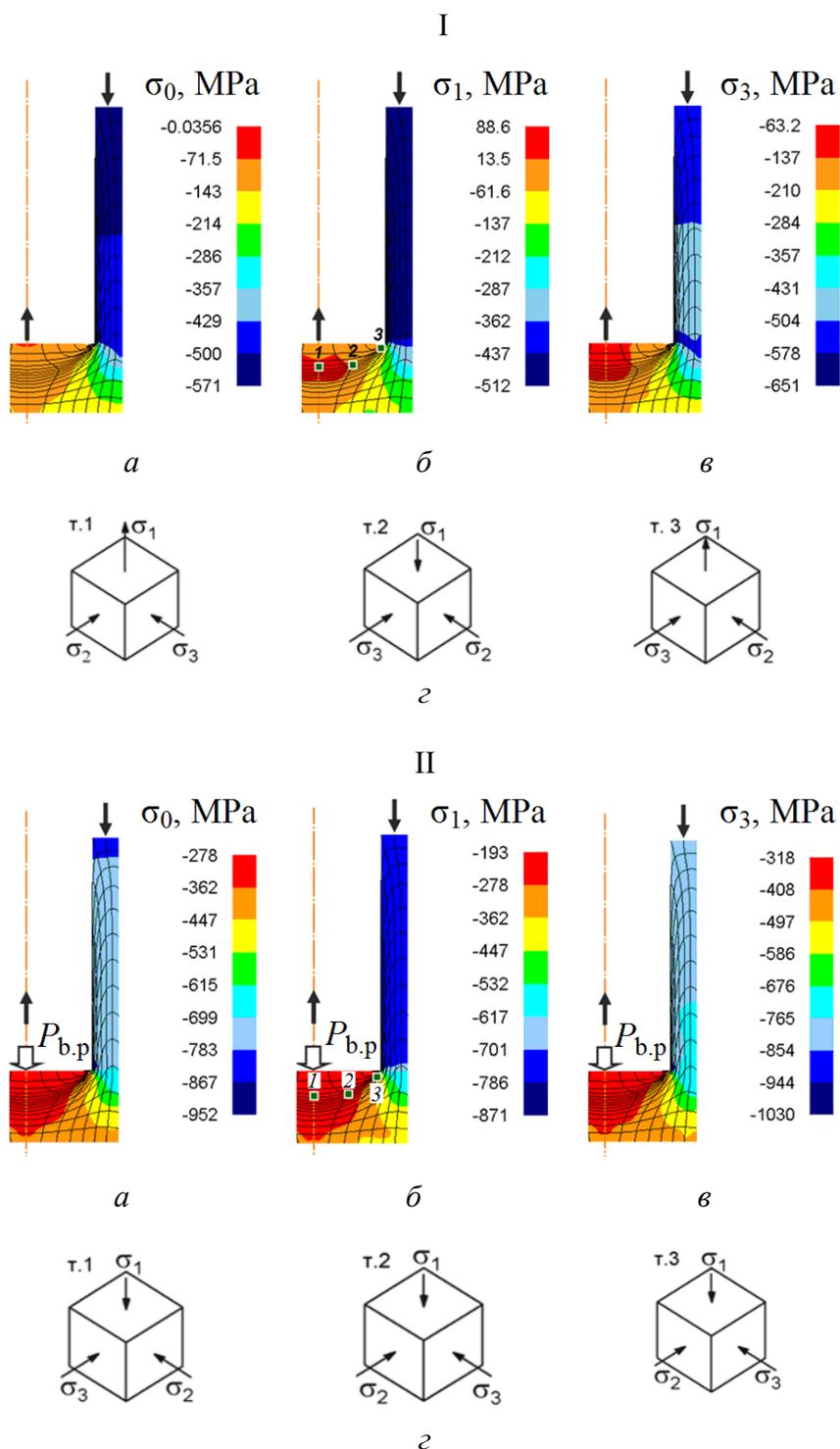


Рис. 3. Поля компонент тензора напряжений на стадии свободного реверсирования: а –  $\sigma_r$ , б –  $\sigma_z$ , в –  $\sigma_\tau$ , з –  $\sigma_{rz}$

По результатам моделирования максимальная главная компонента девиатора напряжения в объеме металла, выдавленном в кольцевую область, составляет  $\sigma_1 - \sigma_0 \approx 0.35\sigma_s$  ( $\sigma_s$  – предел текучести материала). Чтобы свести к нулю главное напряжение  $\sigma_1$ , достаточно повысить абсолютную величину гидростатической компоненты до уровня  $|\sigma_0| = 0.35\sigma_s$ . Таким образом, для создания схемы всестороннего сжатия со стороны выходного канала требуется приложить осевое противодействие, превышающее значение  $0.35\sigma_s$ , а на этапе реверсирования –  $0.87\sigma_s$ .

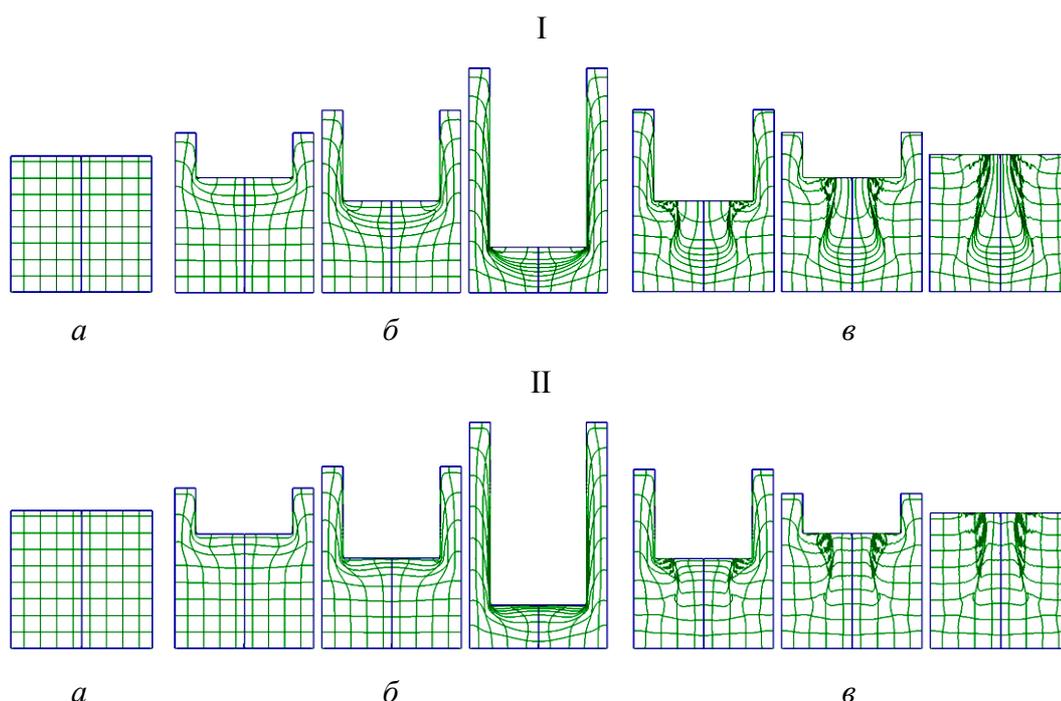
Таким образом, нижняя граница уровня противодействия, достаточного для устранения дефектов формы, соответствует примерно величине предела текучести обрабатываемого материала:  $P_{b.p} \approx \sigma_s$ . Как уже было отмечено, в стремлении улучшить схему напряженного состояния и повысить предельную пластичность материала за счет наращивания в очаге деформаций гидростатического давления следует учитывать, что уровень создаваемого про-

тиводавления должен быть ограничен в соответствии с прочностью деформирующей оснастки и его существенное повышение приведет к снижению технологичности процесса.



**Рис. 4.** Поля напряжений при свободном реверсировании (I) и с противодавлением 200 МПа (II): *a* –  $\sigma_0$ , *б* –  $\sigma_1$ , *в* –  $\sigma_3$ , *г* – схема напряженного состояния в характерных точках 1, 2, 3

С учетом сказанного при исследовании процесса деформирования реверсивным выдавливанием приведенную величину противодействия задавали на уровне  $2\sigma_s$ . Как показано на рис. 4, такого уровня противодействия достаточно для существенного изменения НДС заготовки. Характерной чертой этих изменений является повышение гидростатических сжимающих напряжений во всем объеме заготовки, позволяющих избежать возникновения положительных напряжений. Искажение координатной сетки в условиях всестороннего неравномерного сжатия, созданного противодействием (рис. 5), в сравнении с результатами экспериментов по свободному деформированию (рис. 1,б) демонстрирует протекание процесса без образования видимых дефектов.



**Рис. 5.** Искажения координатной сетки меридионального сечения заготовки по шагам первого цикла деформирования с противодействием  $P_{b,p} \approx \sigma_s$  (I) и  $P_{b,p} \approx 2\sigma_s$  (II): *a* – координатная сетка до деформации, *б* – при выдавливании, *в* – при реверсировании

Согласно изменениям в системе напряжений при наложении противодействия изменяется и развитие пластической зоны металла. Для сравнения на рис. 5 представлены картины формирования очага деформаций при использовании противодействия разной интенсивности:  $\sigma_s$  (I) и  $2\sigma_s$  (II). Во втором случае наблюдается уменьшение зоны распространения очага деформации в осевом направлении в сочетании с выравниванием координатной сетки. Однако образование поверхности с пиковыми значениями деформации у кромки внутреннего пуансона при недостаточном уровне гидростатического давления значительно повышает вероятность исчерпания ресурса пластичности в процессе деформирования [8], примером чего является растрескивание заготовки из магниевого сплава AZ31 на этапе реверсирования (см. рис. 1,жс) [9].

Это указывает на необходимость оценки эффективности созданного напряженного состояния как параметра, влияющего на деформируемость материала, и определения на каждом этапе обработки остаточной пластичности с целью установления возможности проведения очередной операции. Этим вопросам будет посвящена вторая часть исследований.

### Выводы

Изучено напряженно-деформированное состояние заготовки при свободном реверсивном выдавливании. Выявлены характерные для традиционных процессов продольного выдавливания дефекты в виде отклонений формы и складок, обусловленные неравномерностью напряженно-деформированного состояния. Для устранения условий образования дефектов формы достаточно приложенного противодействия, соответствующего величине предела текучести обрабатываемого материала. Для повышения равномерности распределения деформаций в заготовке рекомендовано увеличить уровень противодействия вдвое. Сохраняемая на всех этапах реверсивного выдавливания резко выраженная неравномерность деформации способствует образованию и развитию опасного (с точки зрения разрушения) сечения. Поэтому очередной задачей исследования является оценка деформируемости материала при заданных условиях обработки.

1. *С.В. Мирошниченко, В.Н. Варюхин*, ФТВД **27**, № 3, 20 (2017).
2. *Д.П. Кузнецов*, Вестник машиностроения № 2, 40 (1959).
3. *Ф.А. Мартиросян*, Изв. ВУЗов. Машиностроение № 10, 147 (1966).
4. *С.И. Губкин*, Пластическая деформация металлов, Металлургиздат, Москва (1960).
5. *В.А. Евстратов*, Теория обработки металлов давлением, Высшая школа, Харьков (1981).
6. *М.В. Сторожев, Е.А. Попов*, Теория обработки материалов давлением, Машиностроение, Москва (1977).
7. *В.Л. Колмогоров*, Напряжения, деформации, разрушение, Металлургия, Москва (1970).
8. *А.Г. Овчинников, А.А. Головин, А.М. Дмитриев*, КШП № 1, 7 (1980).
9. *S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki*, Mater. Sci. Eng. **528**, 3806 (2011).
10. *Л.И. Алиева*, Технологические системы № 1,31 (2017).
11. *Л.И. Алиева*, Вестник ХНТУ № 4(59), 18 (2016).
12. *В.С. Смирнов*, Теория обработки металлов давлением, Металлургия, Москва (1973).
13. *А.И. Целиков*, Вопросы обработки металлов давлением, Изд-во АН СССР, Москва (1958).

*S.V. Miroshnichenko*

METAL DEFORMABILITY AT REVERSAL EXTRUSION.  
PART 1. THE EFFECT OF NON-UNIFORMITY OF THE STRESS STATE  
OF THE BILLET ON THE DEFECT FORMATION

The results of simulation of free reversal extrusion process are reported. The zones of visible defects formation are shown and the reasons for their occurrence are described. The rationale for the choice of the value of the back pressure as a factor ensuring the formation of a system of stresses that prevents the nucleation of defects is given.

**Keywords:** reversal extrusion, defects, back pressure, simulation, stress fields, coordinate grid

**Fig. 1.** Formation of defects (I, II, III) at the stage of numerical ( $a$ – $e$ ) and physical ( $z$ – $e$ ) experiments:  $a, z$  – initial state;  $b, d$  – stage of extrusion;  $e, e$  – stage of reversal;  $\kappa$  – emergence of a crack in the course of reversal of the billet when testing AZ31 alloy according to the data of [9]

**Fig. 2.** Field of hydrostatic stress  $\sigma_0$  (---) at the 6-th step of deformation ( $a$ , control points 1, 2 are marked in the inset) and evolution of the principal stresses  $\sigma_1$  ( $\square$ ),  $\sigma_2$  ( $\circ$ ),  $\sigma_3$  ( $\Delta$ ) at the control points 1 ( $b$ ) and 2 ( $e$ ) by the steps of the first half-cycle

**Fig. 3.** Fields of the stress tensor components at the stage of free reversal:  $a$  –  $\sigma_r$ ,  $b$  –  $\sigma_z$ ,  $e$  –  $\sigma_\tau$ ,  $z$  –  $\sigma_{rz}$

**Fig. 4.** Field of stress under free reversal (I) and under back pressure of 200 MPa (II):  $a$  –  $\sigma_0$ ,  $b$  –  $\sigma_1$ ,  $e$  –  $\sigma_3$ ,  $z$  – scheme of the stressed state at characteristic points 1, 2, 3

**Fig. 5.** Distortions of the coordinate grid of the meridional section of the billet by the steps of the first cycle of deformation by back pressure  $P_{b.p} \approx \sigma_s$  (I) and  $P_{b.p} \approx 2\sigma_s$  (II):  $a$  – coordinate grid before deformation,  $b$  – under extrusion,  $e$  – under reversal