

PACS: 81.40.Lm, 81.40.-z

С.В. Мирошниченко

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ. ЧАСТЬ II. АНАЛИЗ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ. СРАВНЕНИЕ ДВУХ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ

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

Статья поступила в редакцию 11 января 2021 года

На основе результатов численного моделирования проведено сравнение двух конструктивных вариантов получения градиентной архитектуры по признаку деформируемости металла. Выполнена оценка степени использования ресурса пластичности в опасных точках сечения заготовок с применением тензорного критерия Деля. Выбор критерия основан на результатах анализа истории деформирования.

Ключевые слова: реверсивное выдавливание, деформируемость металла, показатель напряженного состояния, интенсивность деформации, предельная деформация, пути деформирования, критерий деформируемости, ресурс пластичности

Как было показано ранее [1], присущая процессу реверсивного выдавливания неравномерность напряженно-деформируемого состояния наряду с возможностью бесконечно наращивать суммарное значение интенсивности деформации многоциклового обработкой являются предпосылкой исчерпания ресурса пластичности металла после определенного числа проходов и, как следствие, зарождения в нем микродефектов. Прерывание процесса по этой причине наиболее вероятно на этапах реверсирования из-за падения уровня гидростатического давления в зоне локализации максимальных деформаций (рис. 1).

Поэтому условия формирования в материале мультимасштабной градиентной структуры при выборе рациональной технологической схемы процесса [2] должны быть дополнены критерием, характеризующим деформируемость материала и определяющим уровень резерва пластичности, достаточный для проведения очередной операции без риска разрушения заготовки.

В решении данной задачи использовали современную феноменологическую теорию деформируемости [3–6], согласно которой интенсивность накопления повреждений определяют историей деформирования, представленной траекториями движения материальных частиц в пространстве двух показателей напряженного состояния, а предельное состояние материала задают диаграммой пластичности, построенной в тех же координатах. Интенсивность накопленных деформаций в момент разрушения определяют как предельную деформацию:

$$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_{\text{eff}} dt,$$

где $\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}$ – интенсивность скорости деформации, t_p – время деформирования до разрушения.

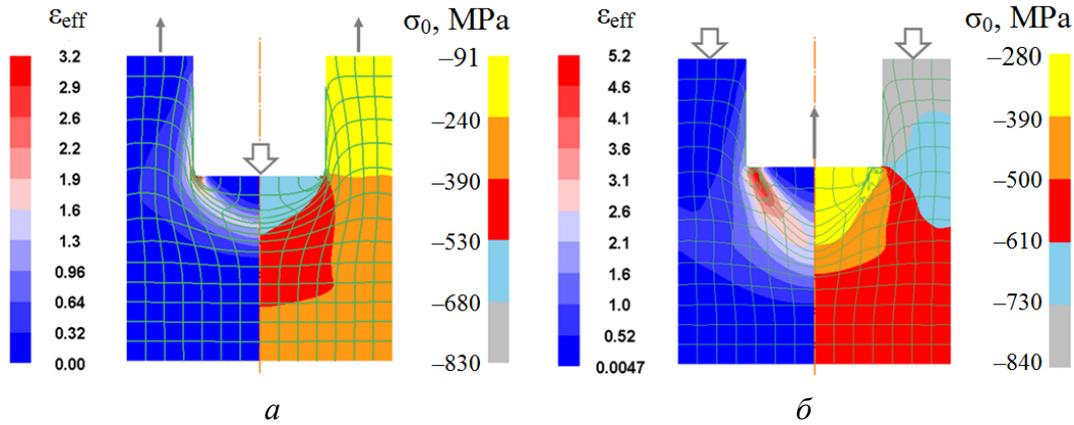


Рис. 1. Поля интенсивности деформаций ε_{eff} и гидростатических давлений σ_0 на стадии установившегося течения этапов выдавливания (а) и реверсирования (б) в первом цикле обработки

В практике оценки деформируемости металла в условиях многоэтапной обработки чаще всего используют критерий Деля–Огородникова, учитывающий влияние различных инвариантов тензора напряжения и нелинейность накопления повреждений [7,8] или тензорный критерий Деля, учитывающий направленность характера повреждений [5,9,10]. При выборе критерия применяют подходы, основанные на оценке показателей траектории деформирования. К таковым относят параметры $\frac{d\eta}{d\varepsilon_{\text{eff}}}$, $\frac{d\mu_\sigma}{d\varepsilon_{\text{eff}}}$ (где η – пока-

затель жесткости напряженного состояния), характеризующие скорость накопления повреждений или их залечивания в зависимости от знака производной, и кривизну путей деформирования, определяемую величиной

$$k = \sqrt{\left(\frac{d^2\eta}{d\varepsilon_{\text{eff}}^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2\mu_\sigma}{d\varepsilon_{\text{eff}}^2}\right)^2} \quad [11,12].$$

Согласно предложенным подходам изме-

нения данных параметров в пределах $\frac{d\eta}{d\varepsilon_{\text{eff}}} > 2$, $\frac{d^2\eta}{d\varepsilon_{\text{eff}}^2} \geq 3$ ($0.08 \leq k \leq 0.2$), а

также знаков $\frac{d\eta}{d\varepsilon_{\text{eff}}}$ и $\frac{d\mu_\sigma}{d\varepsilon_{\text{eff}}}$ являются условиями использования критерия

Огородникова

$$\psi = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} n \frac{\varepsilon_{\text{eff}}^{n-1}}{e_p(\eta, \eta_k)^n} d\varepsilon_{\text{eff}},$$

в котором скорость накопления и залечивания повреждений входит в виде функций [8]:

$$n = 1 + 0.2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_{\text{eff}}} + \frac{d\eta_k}{de_{\text{eff}}} \right)$$

или в формулировке Сивака [6]:

$$n = 1 + a \frac{d\eta}{de_{\text{eff}}} - b \frac{d\mu_{\sigma}}{de_{\text{eff}}}.$$

Здесь η_k ($k = 1, 2$) – показатель напряженного состояния: η_1 – параметр Надаи–Люде, η_2 – показатель напряженного состояния, учитывающий влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность; a, b – экспериментальные коэффициенты.

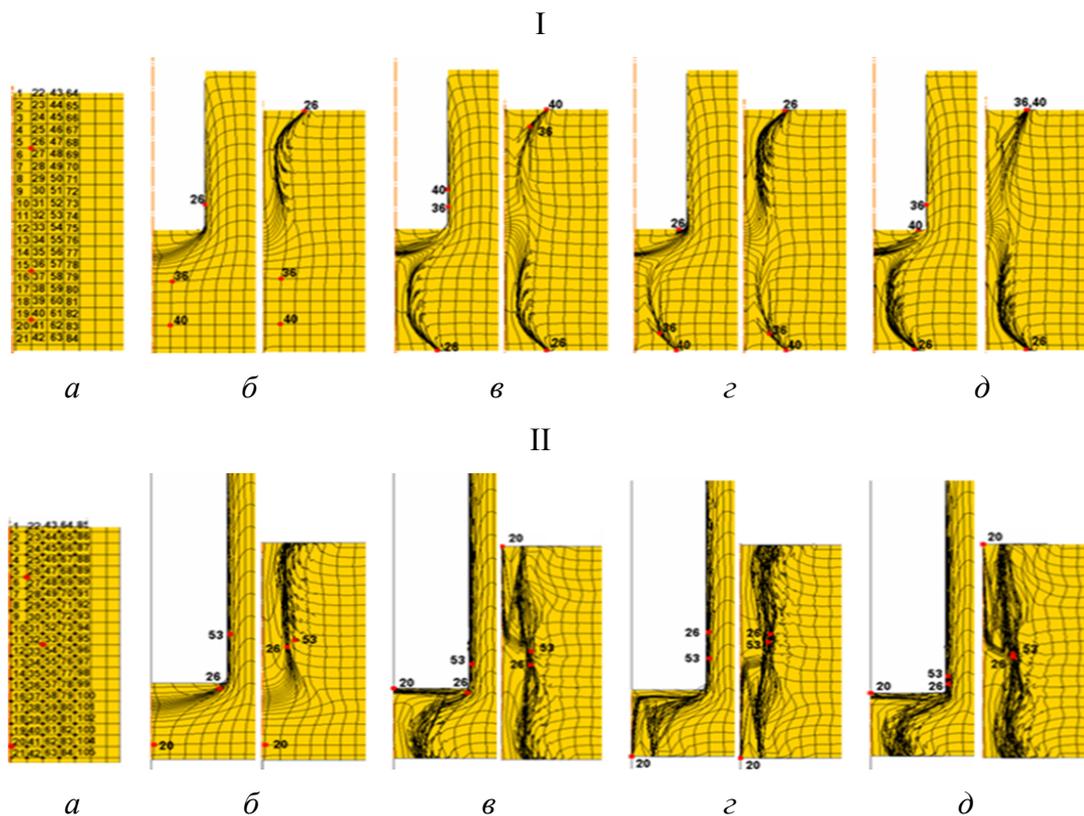


Рис. 2. Положение контрольных точек в сечении заготовки: *a* – исходное положение, *б–д* – на последнем шаге этапов деформирования по вариантам соответственно I, II

Для условий деформации с траекториями большой кривизны ($k > 0.2$) с более широким диапазоном значений производных использованный ресурс пластичности обычно оценивают тензорным критерием Дея [9]:

$$\Psi = \sqrt{\Psi_{ij} \Psi_{ij}},$$

компоненты которого определяют как

$$\Psi_{ij} = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} F(\varepsilon_{\text{eff}}, \eta_k) \beta_{ij} d\varepsilon_{\text{eff}}.$$

Здесь $F(\varepsilon_{\text{eff}}, \eta_k)$ – функция характеристик материала; β_{ij} – направляющий тензор приращений деформаций с компонентами:

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\varepsilon_{\text{eff}}}.$$

Характер изменения напряженного состояния заготовки устанавливали по результатам численного моделирования с использованием программного комплекса DEFORM-2D на восьми этапах с чередованием операций формирования стакана выдавливанием с обратным истечением металла и возвращением заготовки к исходной форме.

Исследовали два варианта (I, II) конструктивного исполнения процесса, отвечающих критериям формирования в материале двухкомпонентной архитектуры [2]. В них параметры заготовки и инструмента соответствуют вариантам № 8 и № 9 из плана численного эксперимента [2]. Так, варианту I соответствуют соотношения $H/D = 1.5$, $\Delta h/H = 0.5$, $d/D = 0.5$, варианту II – $H/D = 1.5$, $\Delta h/H = 2.3$, $d/D = 0.7$ ($H, D, d, \Delta h$ – параметры, характеризующие соответственно высоту и диаметр заготовки, диаметр формируемой в заготовке полости и ход внутреннего пуансона).

При постановке задачи механические свойства модельного материала заданы кривой упрочнения, учитывающей эффект Баушингера [13], и предельной поверхностью, аппроксимация которой представлена в виде [14]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = \frac{1.3 \exp(-0.3254\eta)}{1 - 0.621\mu_\sigma + 0.2584\mu_\sigma^2}.$$

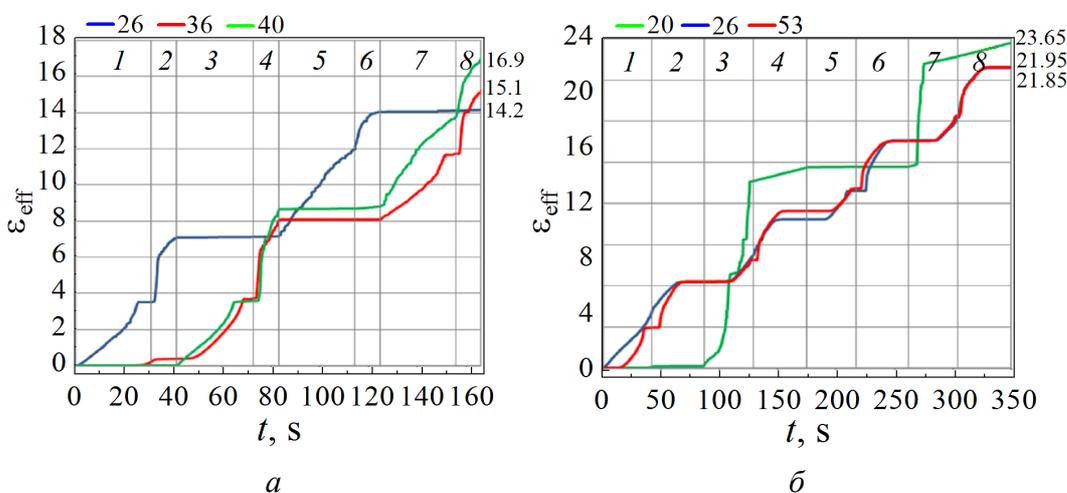


Рис. 3. Нарастание интенсивности деформации ε_{eff} в опасных точках при деформировании по вариантам I (a) и II (б); 1–8 – этапы деформирования

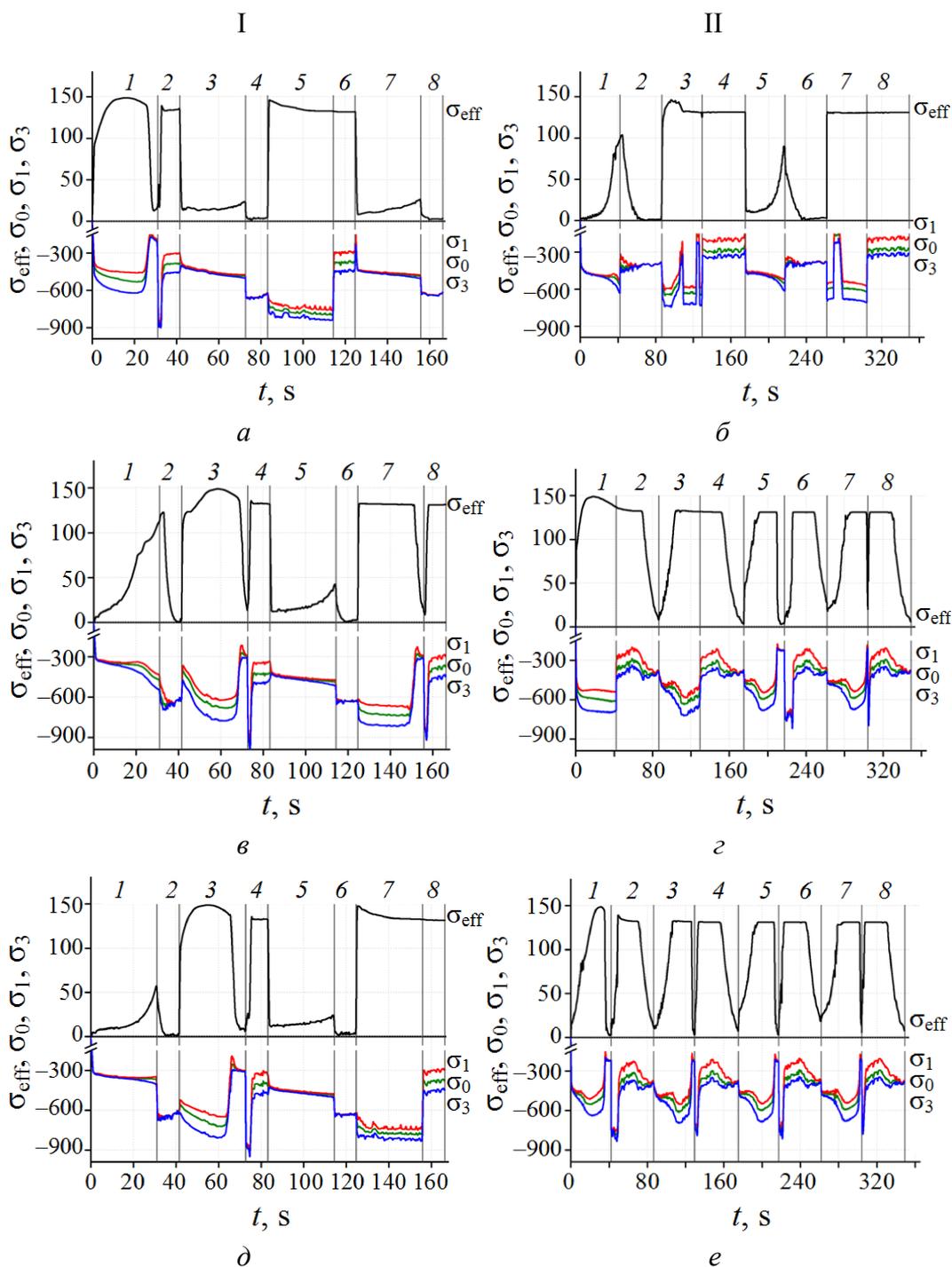


Рис. 4. Графики изменения максимальной σ_1 и минимальной σ_3 компонент тензора напряжений, среднего σ_0 и эквивалентного σ_{eff} напряжений в трассируемых точках: 26 (а), 36 (б), 40 (д) для варианта I и 20 (б), 26 (з), 53 (е) для варианта II; 1–8 – этапы деформирования

Для расчетов использовали значения параметров напряженно-деформированного состояния в контрольных точках, расставленных в узлах координатной сетки в области локализации максимальных деформаций (рис. 2,а).

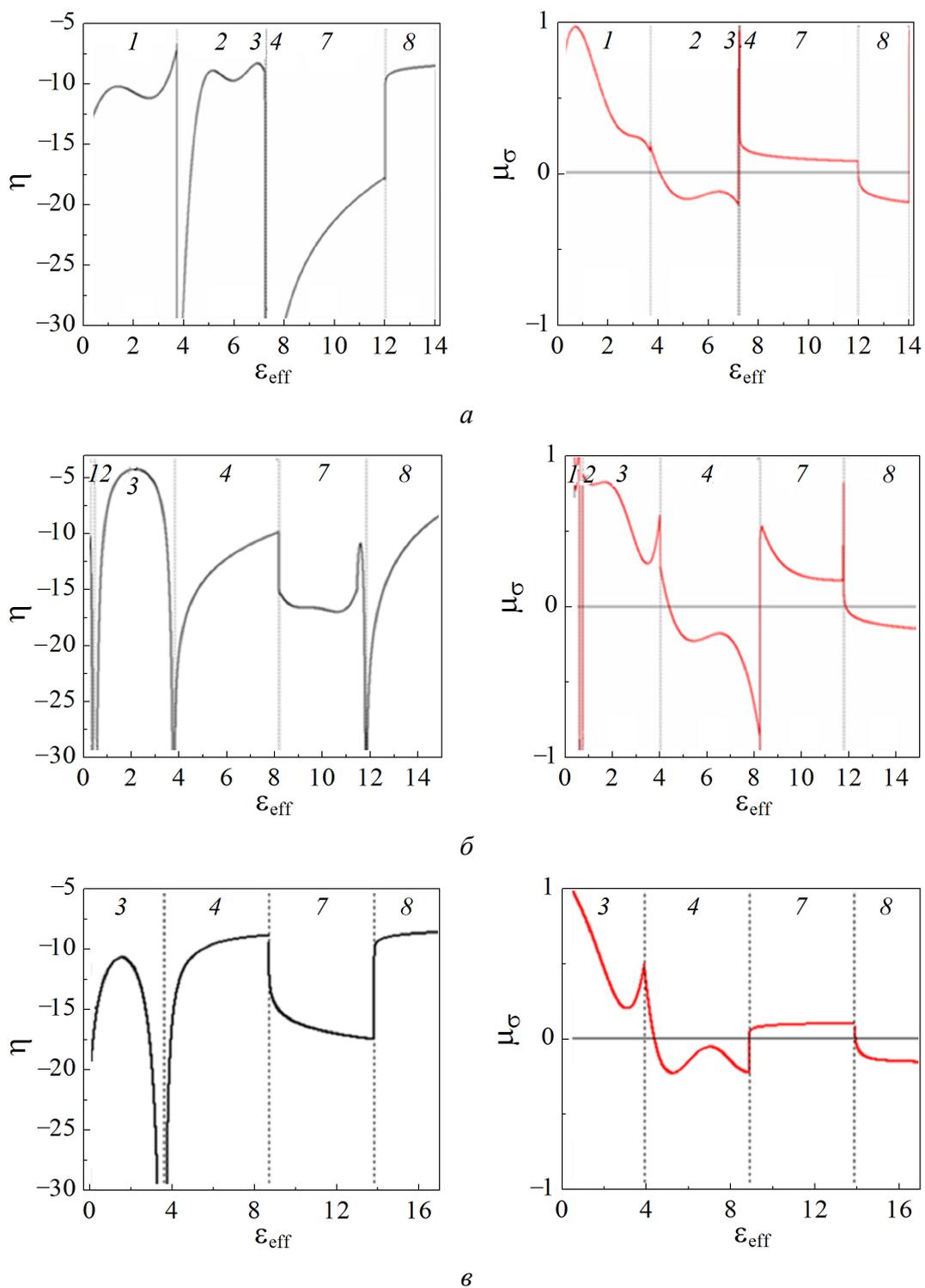


Рис. 5. Пути деформирования $\eta(\epsilon_{\text{eff}})$ и $\mu_\sigma(\epsilon_{\text{eff}})$ опасных точек 26 (а), 36 (б), 40 (в); 1–8 – этапы реверсивного выдавливания по варианту I

Из массива данных, рассчитанных для каждого текущего шага, по значениям суммарных деформаций и показателей напряженного состояния выделены области материала, принимаемые для исследования как потенциально

опасные с точки зрения разрушения. Таковыми являются отмеченные красным цветом материальные частицы 26, 36, 40 при нагружении по варианту I и 20, 26, 53 – по варианту II.

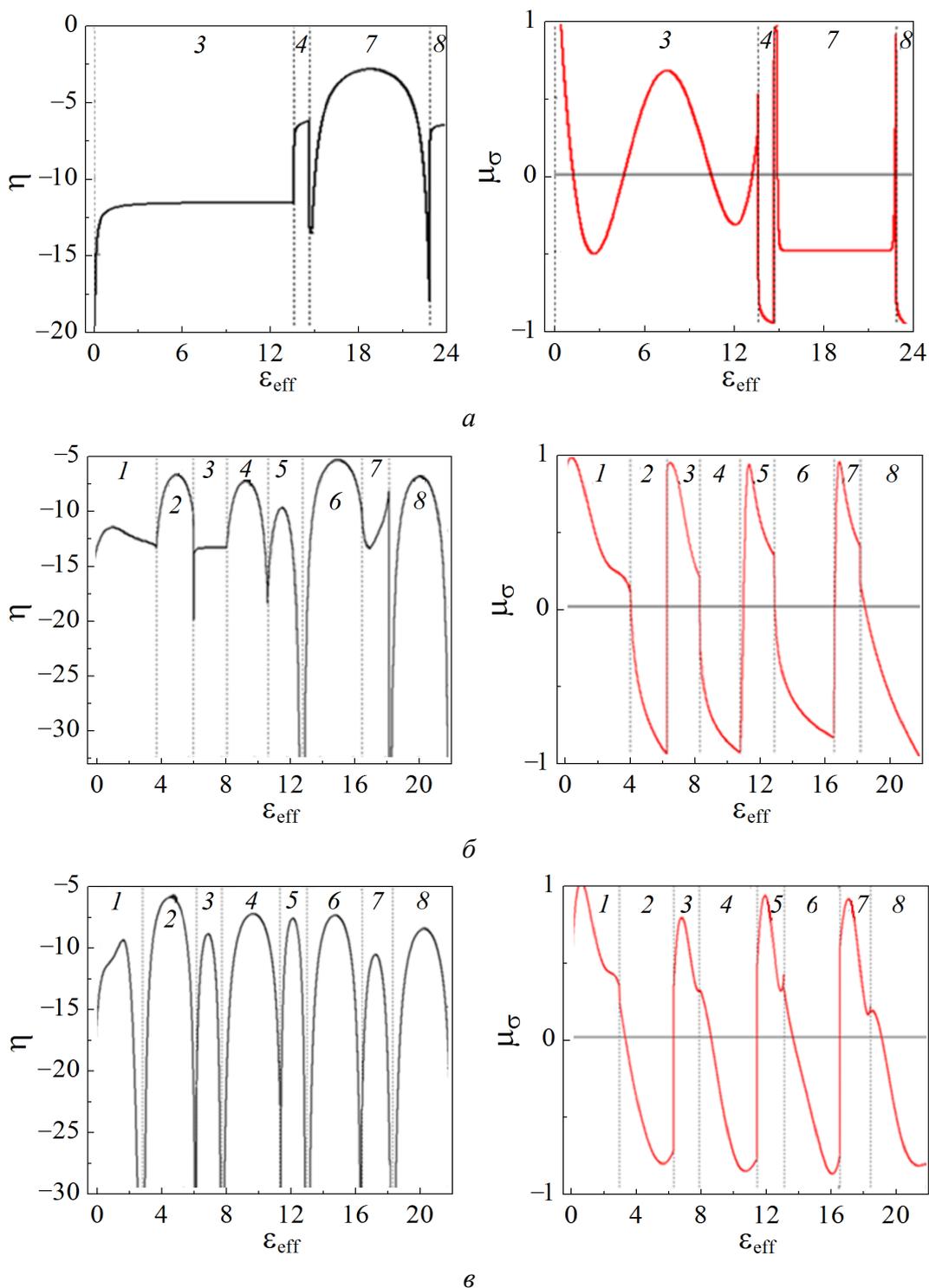


Рис. 6. Пути деформирования $\eta(\epsilon_{\text{eff}})$ и $\mu_{\sigma}(\epsilon_{\text{eff}})$ опасных точек 20 (а), 26 (б), 53 (в) на этапах реверсивного выдавливания по варианту II; 1–8 – этапы деформирования

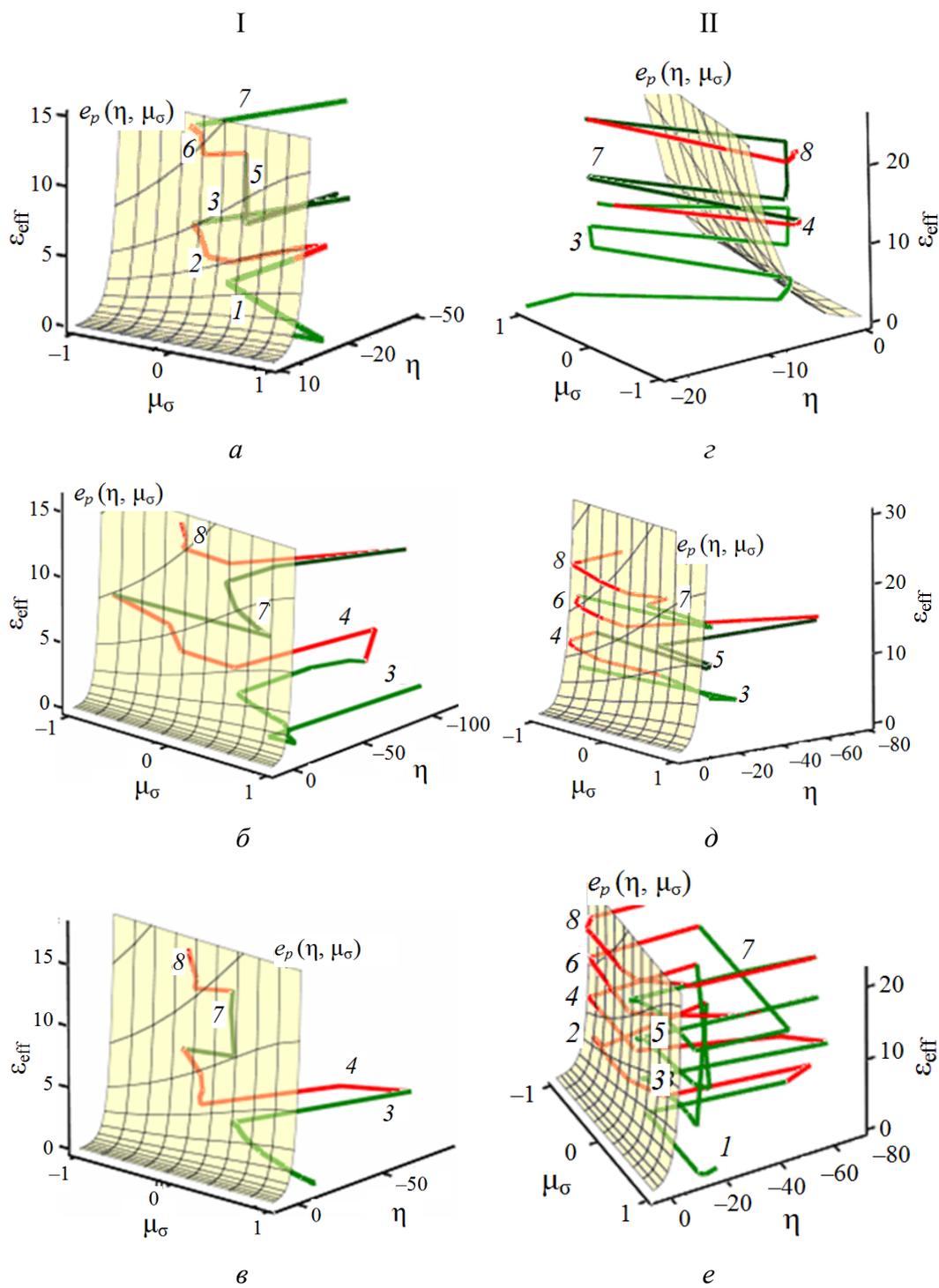


Рис. 7. Поверхность предельной пластичности сплава АД1 $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ и траектории деформирования $\epsilon_{eff}(\eta, \mu_\sigma)$ точек 26 (а), 36 (б), 40 (в) (вариант I) и точек 20 (з), 26 (д), 53 (е) (вариант II); 1–8 – этапы деформирования

Нарастание по циклам обработки интенсивности деформации ϵ_{eff} в отмеченных точках деформируемого металла по вариантам конструктивного исполнения представлено на рис. 3.

На рис. 4 показано пошаговое изменение компонент главных напряжений σ_1 , σ_3 , гидростатической компоненты σ_0 и интенсивности напряжений σ_{eff} , используемых в расчете показателей напряженного состояния η и μ_σ :

$$\eta = \frac{3\sigma_0}{\sigma_{\text{eff}}}, \quad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Приведенные результаты расчета интенсивности деформаций и напряжений использованы для построения путей деформирования: $\eta(\varepsilon_{\text{eff}})$ и $\mu_\sigma(\varepsilon_{\text{eff}})$ (рис. 5, 6). Как видно из рис. 5, деформирование частиц, обозначенных точками 26, 36, 40, осуществляется в мягких условиях нагружения ($\eta < -8$, $\mu_\sigma > 0$) на стадии выдавливания металла в кольцевую полость (этапы 1, 3, 7), а смена направления путей деформирования на этапах реверсирования (2, 4, 8) смещает данные точки в относительно жесткую зону ($\eta > -8$, $\mu_\sigma < 0$). Ввиду стремительного роста интенсивности деформации до значений $\varepsilon_{\text{eff}} > 7$ опасность достижения предельного состояния возникает уже во втором цикле обработки (рис. 5, в).

Анализ характера путей деформирования опасных точек металла, обрабатываемого по варианту II (рис. 6), указывает на неблагоприятные условия их деформирования на этапах реверсирования каждого цикла (2, 4, 6, 8). Это объясняется тем, что показатели схемы напряженного состояния попадают в области значений $\eta > -8$, $\mu_\sigma < -0.5$ при уровне интенсивности деформаций, превышающем 6 единиц после первого цикла деформирования и 11 единиц – после второго (рис. 6, б).

На рис. 7 представлены траектории деформирования $\varepsilon_{\text{eff}} = f(\eta, \mu_\sigma)$, построенные для двух конструктивных вариантов реверсивного выдавливания. Как видно, деформирование частиц материала, нагружаемого по варианту I (а–в), проходит в области мягких схем нагружения и не достигает критического уровня деформаций. В случае выполнения варианта II превышение предельной пластичности металла отмечено в точках 20 (з), 26 (д) на этапе реверсирования второго цикла, а в точке 53 (е) – на этапе реверсирования первого цикла.

Исходя из того, что обработка материала реверсивным выдавливанием проходит в условиях сложного немонотонного нагружения, а геометрия путей деформирования характеризуется большой кривизной с диапазоном значений скорости накопления повреждений, существенно превышающим установленные пределы, значение использованного ресурса пластичности рассчитывали по критерию Деля с уточненным видом функций $F(\varepsilon_{\text{eff}}, \eta_k)$ и $\beta_{ij}(\varepsilon_{\text{eff}})$, выраженных через параметр Надаи–Лоде [4,15]. Таким образом, компоненты тензора повреждений на каждом этапе находили по формулам

$$\psi_1 = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} \left(1 - a + 2a \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_1 \frac{d\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)},$$

$$\psi_2 = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} \left(1 - a + 2a \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_2 \frac{d\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)},$$

$$\psi_3 = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} \left(1 - a + 2a \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_3 \frac{d\varepsilon_{\text{eff}}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}.$$

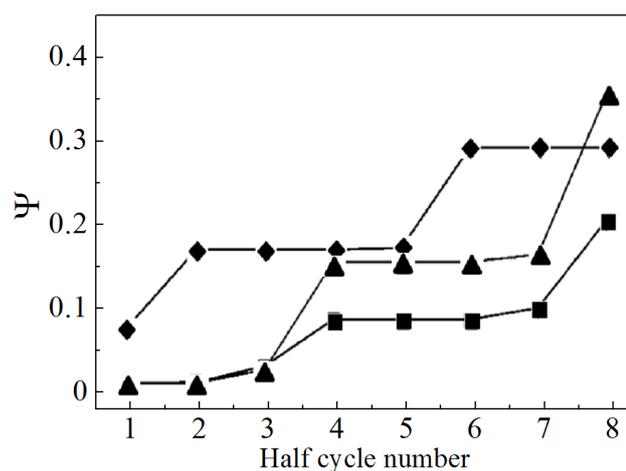
Для сплава АД1 коэффициент $a = 0.2$ [16].

Главные компоненты направляющего тензора β_{ij} определяли как:

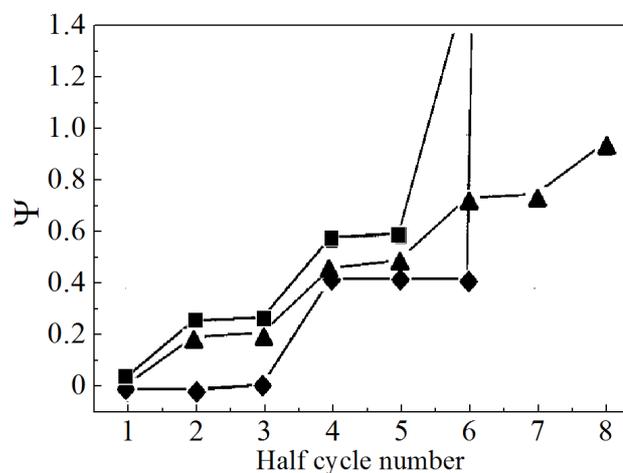
$$\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_2 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}.$$

Степень использованного ресурса пластичности этапа находили по формуле

$$\Psi = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2}.$$



a



б

Рис. 8. Степень истощения ресурса пластичности по этапам реверсивного выдавливания для двух вариантов деформирования: *a* – I (◆ – точка 26, ■ – 36, ▲ – 40), *б* – II (◆ – точка 20, ■ – 26, ▲ – 53)

Итоговую величину степени использования запаса пластичности рассчитывали суммированием этапных значений. Результаты поэтапного расчета приведены на рис. 8. Как видим, при реверсивном выдавливании по варианту I сохраняется достаточный запас пластичности, так как наибольшая величина использованного ресурса пластичности материала в точке 40 ($\Psi_{40} = 0.35$) меньше величины допустимого предельного значения. При деформировании по варианту II ресурс пластичности материала полностью исчерпан на третьем цикле обработки.

Выводы

Проведена оценка деформируемости заготовки в условиях реверсивного выдавливания на примере двух вариантов реализации процесса, направленного на формирование в заготовке мультимасштабной градиентной структуры. Выполнен расчет степени исчерпания ресурса пластичности с применением тензорного критерия Деля, учитывающего немонотонность процесса. Выбор критерия основан на результатах анализа истории деформирования.

Установлено, что при использовании первого варианта материал, проходящий восемь этапов деформирования, характеризуется значительным запасом ресурса пластичности, что объясняется мягкой схемой напряженного состояния. Во втором варианте деформирования ресурс пластичности исчерпывается полностью на этапе реверсирования третьего цикла обработки при величине накопленной деформации 5 единиц.

1. С.В. Мирошниченко, ФТВД **29**, № 3, 31 (2019).
2. С.В. Мирошниченко, ФТВД **28**, № 2, 20 (2018).
3. В.Л. Колмогоров, Напряжения, деформации, разрушение, Металлургия, Москва (1970).
4. Г.Д. Дель, Технологическая механика, Машиностроение, Москва (1978).
5. В.А. Огородников, Оценка деформируемости металлов при обработке давлением, Вища школа, Киев (1983).
6. И.О. Сивак, Е.И. Коцюбовская, Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: зб. наук. пр., ДДМА, Краматорськ (2007), с. 73–76.
7. Г.Д. Дель, В.А. Огородников, В.Г. Нахайчук, Изв. ВУЗов, Машиностроение № 4. 19 (1975).
8. И.О. Сивак, В.А. Огородников, Р.И. Сивак, А.Я. Мысловский, Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: темат. зб. наук. пр., ДДМА, Краматорськ (2000), с. 29–33.
9. Г.Д. Дель, в сб: Физика и техника высоких давлений, Наукова думка, Киев (1983), вып. 11, с. 28–32.
10. Р.И. Сивак, В.А. Огородников, И.О. Сивак, Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування **3**, № 78, 97 (2016).
11. В.А. Огородников, А.В. Грушко, А.В. Гуцалюк, Вісник машинобудування та транспорту № 1, 67 (2015).
12. V.A. Ogorodnikov, I.A. Dereven'ko, R.I. Sivak, Mater. Sci. **54**, 326 (2018).

13. С.В. Мирошниченко, ФТВД 27, № 3, 1 (2017).
14. В.А. Огородников, Н.В. Бабак, Е.И. Сивак, Захист металургійних машин від поломок: Міжвуз. темат. зб. наук. пр., ПДТУ, Маріуполь (2002), № 6, с. 56–60.
15. Р.И. Сивак, Е.И. Коцюбовская, Наукові праці ВНТУ № 1, 1 (2011).
16. Р.И. Сивак, К.И. Коцюбовська, С.И. Сухоруков, Вісник машинобудування та транспорту № 2(4), 101 (2016).

S.V. Miroshnichenko

METAL DEFORMABILITY UNDER REVERSAL EXTRUSION. PART II. ANALYSIS OF METAL PLASTICITY RESOURCE. COMPARISON OF TWO DESIGN OPTIONS

Based on the results of numerous simulations, two design options for obtaining a gradient architecture with respect to the deformability of the metal are compared. The estimate of the degree of the resource of plasticity at the dangerous points of the billet section is carried with using Del tensor criterion. The choice of the criterion is based on the results of the analysis of the deformation history

Keywords: reversal extrusion, deformability of metal, parameter of stressed state, effective strain, ultimate strain, deformation paths, deformation trajectories, plasticity resource

Fig. 1. The fields of effective strain ε_{eff} (on the left) and hydrostatic stresses σ_0 (on the right) in the steady flow at the stage of extrusion (a) and reversing (b) of the first cycle

Fig. 2. Position of the control points in the cross-section of the billet: a – initial position, b–d – at the last step of the deformation stages according to options I, II

Fig. 3. Increase in the intensity of deformations ε_{eff} at the dangerous points during deformation according to options I (a) and II (b); 1–8 – deformation stages

Fig. 4. Changes in the maximum component of the stress tensor σ_1 and the minimum one σ_3 , mean stress σ_0 , effective stress σ_{eff} at the traced points: 26 (a), 36 (b), 40 (d) according to options I and 20 (b), 26 (z), 53 (e) according to options II; 1–8 – deformation stages

Fig. 5. Deformation paths $\eta(\varepsilon_{\text{eff}})$ and $\mu_{\sigma}(\varepsilon_{\text{eff}})$ of dangerous points 26 (a), 36 (b), 40 (b) during stages of reversal extrusion according to variant I; 1–8 – deformation stages

Fig. 6. Deformation paths $\eta(\varepsilon_{\text{eff}})$ and $\mu_{\sigma}(\varepsilon_{\text{eff}})$ of dangerous points 20 (a), 26 (b), 53 (b) during stages of reversal extrusion according to variant II; 1–8 – deformation stages

Fig. 7. Surface of ultimate strain of the AD1 aluminum alloy and deformation trajectories of points 26 (a), 36 (b), 40 (b) (variant I) and 20 (z), 26 (d), 53 (e) (variant II); 1–8 – deformation stages

Fig. 8. Rate of plasticity resource during stages of reverse extrusion for two variants of deformation: a – I (♦ – point 26, ■ – 36, ▲ – 40), b – II (♦ – point 20, ■ – 26, ▲ – 53)