

PACS: 81.40.Lm, 81.40.-z

С.В. Мирошниченко, В.Н. Варюхин

АНАЛИЗ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ РЕВЕРСИВНОЙ ЗАКРЫТОЙ ПРОШИВКИ

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

Статья поступила в редакцию 30 июня 2017 года

Приведен анализ изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) при обработке металла интенсивным пластическим деформированием (ИПД) по схеме реверсивной закрытой прошивки (РЗП). Исследование выполнено по результатам моделирования процесса с использованием конечно-элементного комплекса DEFORM-2D. Выявлены особенности течения металла и развития очага ИПД при многопроходном процессе деформирования.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, интенсивная пластическая деформация, моделирование, реверсивная закрытая прошивка

Введение

Как известно, достижение больших значений накопленной деформации ($\epsilon > 6-8$) в условиях высоких гидростатических давлений ($P > 1 \text{ GPa}$) и низких температур ($T < 0.4T_m$) вызывает существенные изменения в структуре материала и определяет создание особого комплекса его физико-механических свойств [1]. Широко используемым средством, позволяющим реализовать возможность пластической деформации как инструмента формирования структуры широкого спектра материалов, является ИПД [2,3].

Особые перспективы в области ИПД обещает развитие технологии РЗП, предложенной как способ создания эффективных структурных состояний и высоких прочностных характеристик в крупногабаритных заготовках из различных металлов и сплавов [4]. Возможности данной технологии подтверждаются более поздними исследованиями [5-8], использующими аналогичную РЗП идею – Accumulative Back Extrusion (ABE) для формирования в сплавах AZ31 и A356 субмикроструктурной структуры. По утверждению авторов [7,8], один цикл обработки этим способом приводит к уменьшению среднего размера фрагментов в структурах сплавов до 1-2 μm , увеличению прочностных характеристик в 1.5-2 раза при сохранении пластичности на уровне 7-8% и росту микротвердости более чем на 30% по сравнению с исходным состоянием.

Наряду с всесторонним изучением эволюции микроструктуры сплавов при многопроходном АВЕ в широком диапазоне температур [5–8] в этой серии работ недостаточно информации о развитии НДС в соответствующих термомеханических условиях. Результаты численного исследования АВЕ [6] показали возможность достижения высокой интенсивности ($\varepsilon_{\text{eff}} = 4\text{--}5$) и однородности эквивалентных деформаций за цикл обработки. Однако моделирование многоциклового процесса ограничено расчетом только одного цикла деформирования, а влияние многопроходности процесса на деформированное и напряженное состояния сплавов в работах [6,8] не показано.

Особенностью метода РЗП в сравнении с АВЕ является наличие в конструкции для его осуществления устройства противодействия [4,9], предназначенного для создания более благоприятной схемы напряженного состояния, повышающей деформируемость материала заготовки и препятствующей его растрескиванию, которое наблюдается в работе [7]. Кроме того, в маршрут РЗП включена операция кантовки заготовки на 180° между циклами обработки, способствующая повышению эффективности структурообразования [1]. По оценкам [4,9], используя РЗП, в объеме заготовки можно достичь деформированного состояния с суммарными значениями деформации свыше 6 единиц. Но, как было установлено для ряда методов ИПД, увеличение накопленной деформации сверх значений 6–8 без особых условий деформирования не приводит к дальнейшему измельчению зеренной структуры [10–12]. Кроме того, бесконечное наращивание деформаций ограничено технологической пластичностью материала, а увеличение удельных усилий – возможностями деформирующего инструмента. Поэтому для совершенствования реализуемой схемы, оценки ее возможностей и реакции материала на деформационное воздействие в предлагаемой работе впервые уделено внимание особенностям развития НДС, а также влиянию на него количества проходов, кантовки заготовки между циклами и приложенного противодействия. Для получения данной информации было проведено численное моделирование процесса методом конечных элементов. Следует отметить, что расчет впервые выполнен на основе физически-содержательной модели материала, учитывающей историю нагружения и эволюцию дислокационной структуры при деформации.

1. Моделирование процесса течения металла при РЗП с помощью метода конечных элементов

При создании модели были приняты следующие допущения: процесс деформации – изотермический; материал заготовки – несжимаемое жестко-пластическое изотропное тело. Расчет производили без учета массовых сил.

Вычисление полей напряжений и деформаций в рамках принятых допущений осуществляли при помощи замкнутой системы уравнений, в которую входят уравнения равновесия (1), кинематические соотношения (2), определяющие соотношения теории пластичности Сен-Венана–Леви–Мизеса (3),

уравнение состояния деформируемого материала (4) при условии несжимаемости материала (5):

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (2)$$

$$s_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\text{eff}}}{\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_s(\varepsilon_{\text{eff}}, \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}, T), \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} = 0. \quad (5)$$

В приведенных соотношениях σ_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензоров соответственно напряжений и скоростей деформации; v_i , s_{ij} – компоненты соответственно вектора скоростей и девиатора напряжений; σ_s – предел текучести материала; $\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$, $\varepsilon_{\text{eff}} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} dt$, $\dot{\varepsilon}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}$ – интенсивности соответственно напряжения, степени и скорости деформации; δ_{ij} – символ Кронекера; T – температура.

Для решения приведенной системы уравнений в рамках поставленной задачи в зоне прилипания поверхности контакта заготовки с инструментом граничные условия задавали скоростью перемещения инструмента v_i^* (6), а в зоне скольжения металла по инструменту – смешанными граничными условиями (7), первое из которых – условие непроницаемости, второе – условие трения:

$$v_i = v_i^*, \quad (6)$$

$$v_n = v_n^*, \quad f_\tau = f_\tau(f_n, v_s) \mathbf{i}, \quad (7)$$

где v_n^* – нормальная к поверхности компонента скорости, f_τ – касательная компонента вектора напряжения, f_n – напряжение нормального давления, v_s – скорость скольжения инструмента по деформируемому металлу, \mathbf{i} – единичный касательный вектор, направленный в противоположную сторону от вектора скорости.

На поверхности, где заданы усилия, заданные поверхностные напряжения f_i^* накладывают ограничения на составляющие тензора напряжения в металле:

$$\sigma_{ij} n_j = f_i^*, \quad (8)$$

где n_j – компоненты единичной нормали.

В качестве средства реализации описанной модели был выбран конечно-элементный комплекс DEFORM-2D. Исходными данными для осуществления моделирования являются: геометрия заготовки и деформирующего инструмента, реологическая модель материала заготовки, температурные условия, величина противодействия, условия трения. Расчетная схема моделируемого процесса представлена на рис. 1.

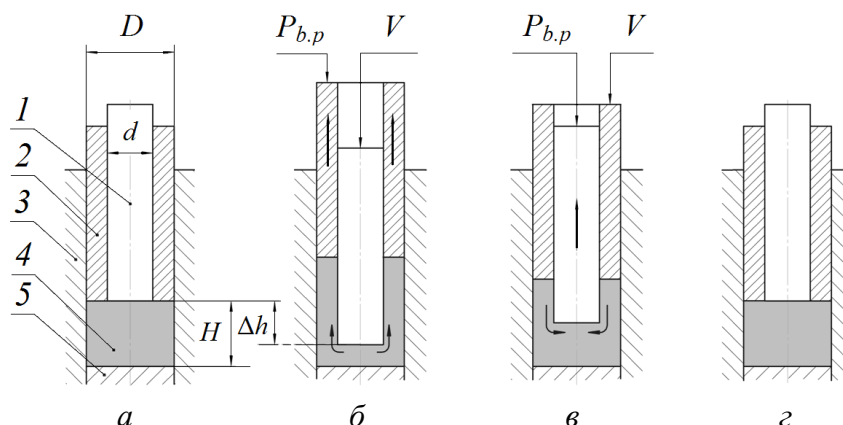


Рис. 1. Расчетная схема процесса РЗП: *а* – исходное положение заготовки, *б* – закрытая прошивка, *в* – реверсирование, *г* – конец цикла; 1, 2 – соответственно внутренний и внешний пуансоны, 3 – штамп, 4 – заготовка, 5 – выталкиватель

Один цикл процесса РЗП включал 2 этапа. На первом выполняли расчет операции закрытой прошивки (ЗП) от начального положения касания ($\Delta h = 0$) внутреннего пуансона 1 с заготовкой 4 (рис. 1,а) до внедрения в нее на глубину $\Delta h = 28$ mm (рис. 1,б). При моделировании второго этапа – операции реверсирования (рис. 1,в) – стартовое положение внешнего пуансона 2 определялось высотой заготовки «стакана», полученной после прошивки. Расчет останавливался, когда заготовка принимала первоначальную форму (рис. 1,г). После окончания цикла РЗП модель заготовки переворачивали на 180° , и оба этапа моделирования повторяли. Полученные в конце каждого расчета поля параметров НДС использовали как исходные данные для моделирования следующей операции. Варьированием числа циклов обработки получали образцы с различной степенью накопленной деформации.

Взаимодействие между жестким инструментом и деформируемым материалом заготовки моделировали с помощью контактных поверхностей с показателем трения по Зибелю, равным 0.4. Скорость движения пуансонов составляла $V_0 = 1$ mm/s, заданное значение противодействия соответствовало $P_{b,p} = 200$ МПа. Температурный режим обработки $T = 20^\circ\text{C}$.

В качестве модели материала заготовки выбран алюминиевый сплав АД1. Его реологию задавали с использованием физико-феноменологической модели пластичности, разработанной для циклических процессов деформирования металлов, характеризующихся большими ИПД в полуцикле ($\varepsilon > 0.1-0.2$) и накопленными деформациями $\int d\varepsilon > 1-2$ [13]:

$$\sigma_{\text{eff}} = \beta m G b \left\{ \frac{(\lambda_{\text{av}} b)^{-1} [\exp(\varepsilon_{\text{eff}}) - 1] + \rho_{s_0} + A \varepsilon_{\text{eff}}}{\exp(\varepsilon_{\text{eff}})} \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

где $\beta = 0.4$ – эмпирический коэффициент, $m = 3.1$ – фактор Тейлора для поликристаллов, G – модуль сдвига, b – модуль вектора Бюргерса, λ_{av} – средняя длина свободного пробега дислокаций после смены знака деформации; ρ_{s_0} – исходная скалярная плотность дислокаций в материале, A – коэффициент, определяемый экспериментально.

Зависимость (9) была встроена в систему базы данных DEFORM-2D в табличной форме для диапазонов значений степени деформации $\varepsilon = 0.01-12$, скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0-6$ и температуры $T = 20^\circ\text{C}$.

2. Анализ результатов моделирования

Развитие НДС металла на стадиях РЗП изучали методом нанесения на меридиональное сечение заготовки координатной сетки с шагом 4 mm (рис. 2,а). На пересечениях линий сетки (А:Е×1:9) были расставлены трассируемые точки, в которых считывали численные значения деформированного и напряженного состояний для дальнейшей интерпретации результатов.

2.1. Деформированное состояние

Данные, полученные методом конечных элементов, сравнивали с результатами эксперимента по деформированию РЗП литой заготовки из сплава АД1 диаметром 42 mm и высотой 35 mm с предварительно нанесенной делительной сеткой, которую по завершении каждого этапа РЗП сканировали и для наглядности переводили в графическое изображение (рис. 3). Сравнение координатных сеток численного (рис. 2) и натурального (рис. 3) экспериментов не показало существенного отличия и в целом позволило заключить, что данный метод моделирования отвечает реальному поведению металла и его можно применять для дальнейших исследований.

Результаты экспериментов свидетельствуют о существенной неоднородности деформации как при ЗП (см. рис. 2,б), так и при реверсировании формы заготовки (рис. 2,в). В ходе деформирования на обоих этапах рассматривали две принципиально отличающиеся зоны: 1) затрудненного деформирования (застойная зона) и 2) интенсивной деформации (участок максимального уплотнения делительной сетки). В процессе ЗП вторая зона развивается по мере внедрения пуансона и, достигнув определенных размеров, не изменяется по форме и величине, а движется со скоростью пуансона вдоль оси, выталкивая металл в радиальном направлении и перемещая прошитую часть вверх. Внешний контур очага деформации зависит от соотношения диаметров заготовки D и внутреннего пуансона d , а также от условий трения на поверхности их контакта [14,15]. При соотношении $d/D = 0.5$ граница распро-

странения очага деформации в ходе операции ЗП не достигает слоев, прилегающих к стенке штампа.

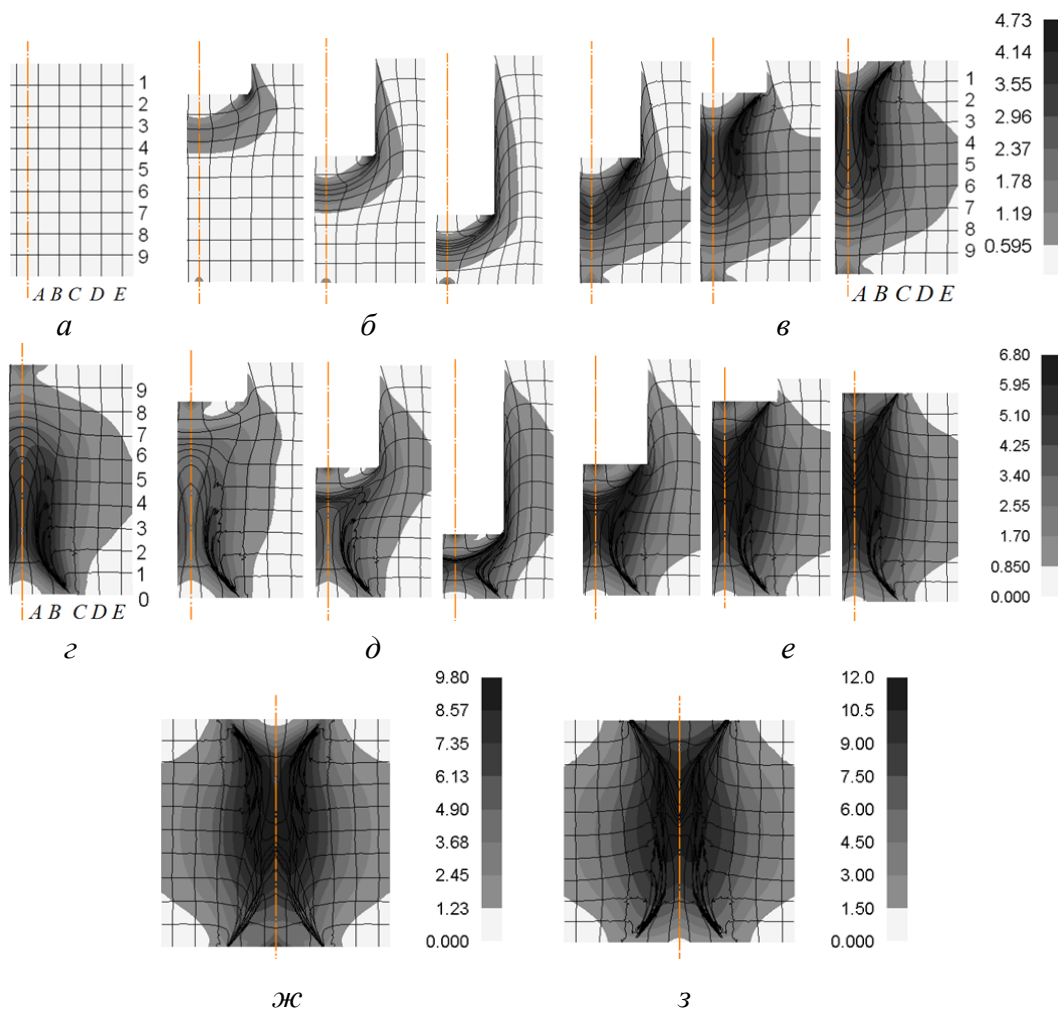


Рис. 2. Поля деформаций ϵ_{eff} и искажение координатной сетки в меридиональном сечении заготовки: *а* – координатная сетка до деформации; *б*, *в* – операции соответственно ЗП и реверсирования в первом цикле обработки; *г* – координатная сетка после кантовки заготовки; *д*, *е* – операции соответственно ЗП и реверсирования во втором цикле обработки; *ж*, *з* – последний шаг соответственно третьего и четвертого циклов

Наличие застойной зоны в области дна внутреннего пуансона объясняется влиянием сил трения на поверхности его контакта с заготовкой, причем чем больше трение между данными поверхностями, тем более явно эта зона выражена, и тем заметнее проявляется неоднородность деформации [14].

При реверсировании осадка кольцевой зоны выдавливает металл из периферийных областей к оси заготовки. Поток металла «тормозится» о застойную зону, образуя у линии скольжения складку. В результате центральная часть заготовки сильно искажается, формируя в последующих циклах очаг суммарной сверхвысокой деформации ($\epsilon_{\text{eff}} > 9$) (рис. 2, *ж*, *з*).

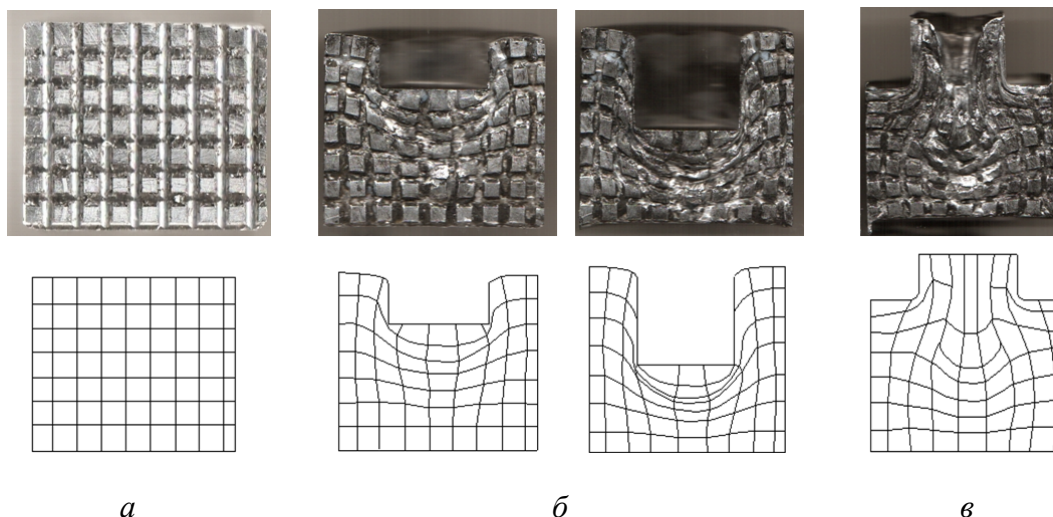


Рис. 3. Искажение координатной сетки на трех стадиях эксперимента: *а* – до деформации, *б* – в ходе операции ЗП, *в* – после реверсирования

Приведенное искажение сетки после кантовки заготовки (см. рис. 2,з) показало аналогичную картину течения металла: формирование застойной зоны, интенсивное искажение сетки в центральной области и монотонное растяжение–сжатие периферийных слоев от операции ЗП (рис. 2,д) к операции реверсирования (рис. 2,е). В застойных зонах деформации, первоначально имевшие малые значения, постепенно суммируются, достигая величин, соизмеримых с таковыми в пластических зонах периферийных слоев. Как результат, за 3–4 цикла (рис. 2,ж,з) прорабатывается практически весь объем заготовки. Количественный анализ представленных на рис. 2 данных показывает, что в центральной части заготовки за один цикл обработки величина суммарной деформации ϵ_{eff} достигает от 2 до 4.7. За четыре цикла обработки уровень накопленной деформации по всему сечению заготовки $\epsilon_{\text{eff}} = 2.4\text{--}11$. Максимальные значения эквивалентных деформаций сосредоточены в центральной части, и их интенсивность снижается к периферии и торцам (рис. 4). При такой неравномерности распределения деформаций от центральной области ($r < 12\text{ mm}$) к периферийной ($r > 16\text{ mm}$) не следует ожидать однородного уровня свойств в получаемых заготовках. Однако этот факт свидетельствует о возможности формирования в них внутренней архитектуры типа мягкая оболочка–твердый сердечник [16], поскольку величина накопленной деформации в приосевой

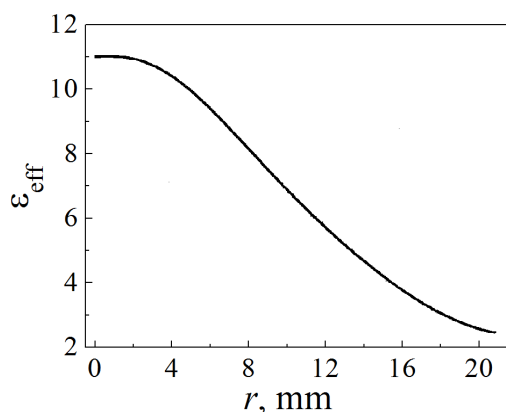


Рис. 4. Распределение накопленной деформации вдоль радиуса заготовки после обработки РЗП

части заготовки, превышающая $\varepsilon_{\text{eff}} = 6$, вполне может обеспечить формирование в этой зоне субмикроструктурных структур в отличие от слабodeформированных наружных слоев. При этом соотношением размеров сердечника и оболочки можно управлять, изменяя геометрию заготовки и инструмента [17].

Известно, что характер изменения физико-механических свойств металла предопределяется схемами главных деформаций [18]. Значения главных компонентов деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ считывали в узловых точках сетки, лежащих на пересечении вертикальных (A, B, C, D, E) и горизонтальных (2, 4, 6, 8) линий (см. рис. 2,а).

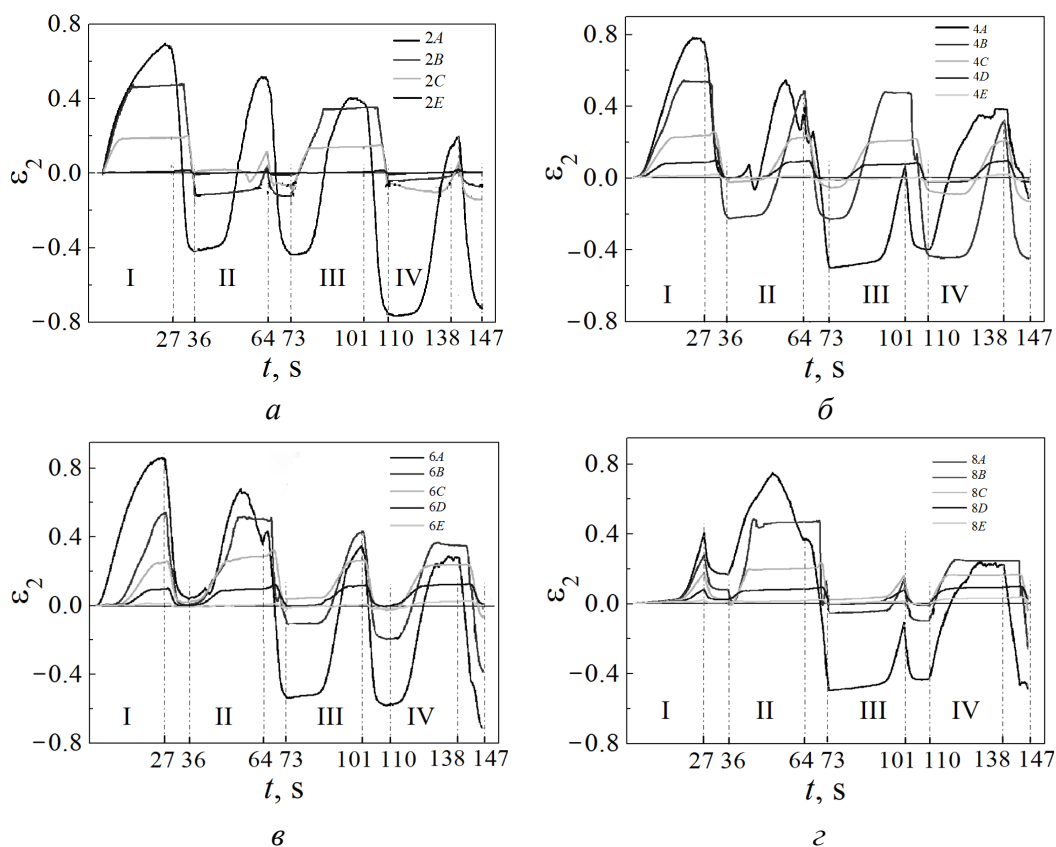


Рис. 5. Изменение расчетной деформации ε_2 при РЗП в точках линий: а – 2, б – 4, в – 6, г – 8; I, II, III, IV – циклы деформирования

Так как максимальная ε_1 и минимальная ε_3 главные деформации разнонаправлены, об изменении деформированного состояния частиц металла можно судить по характеру средней главной деформации ε_2 (рис. 5). Из рисунка видно, что на протяжении четырех циклов обработки слои центральной зоны заготовки подвергаются последовательному сжатию и растяжению, а периферийных областей – сжатию и сдвигу, что свидетельствует о немонотонном характере деформации. Этот факт может способствовать формированию равноосных ультрамелких зерен [1,12,19]. Кроме того, смена направления

главных осей деформации происходит за счет реверсирования и кантовки заготовки между циклами обработки, что по данным [20,21] положительно влияет на эффективность структурообразования.

2.2. Напряженное состояние

Общий характер напряженного состояния в заготовке представлен распределением полей эквивалентного напряжения по Мизесу σ_{eff} (рис. 6). Очаг максимальных значений $\sigma_{\text{eff}} = 150$ МПа распространяется от оси к периферии заготовки и перемещается совместно с внутренним пуансоном вдоль оси, не меняя формы и размера. Аналогичное распределение σ_{eff} наблюдается во всех последующих операциях. Области нулевых значений эквивалентных напряжений в стенках стакана объясняются отсутствием в них деформации. Для количественной оценки влияния числа проходов на напряженное состояние на рис. 7, I приведены эпюры σ_{eff} вдоль оси симметрии, внутренней поверхности стенки выдавленного стакана и наружной поверхности заготовки на стадиях установившегося течения при ЗП и реверсировании. Сопоставление эпюр σ_{eff} не выявило существенных изменений этого параметра после нескольких проходов.

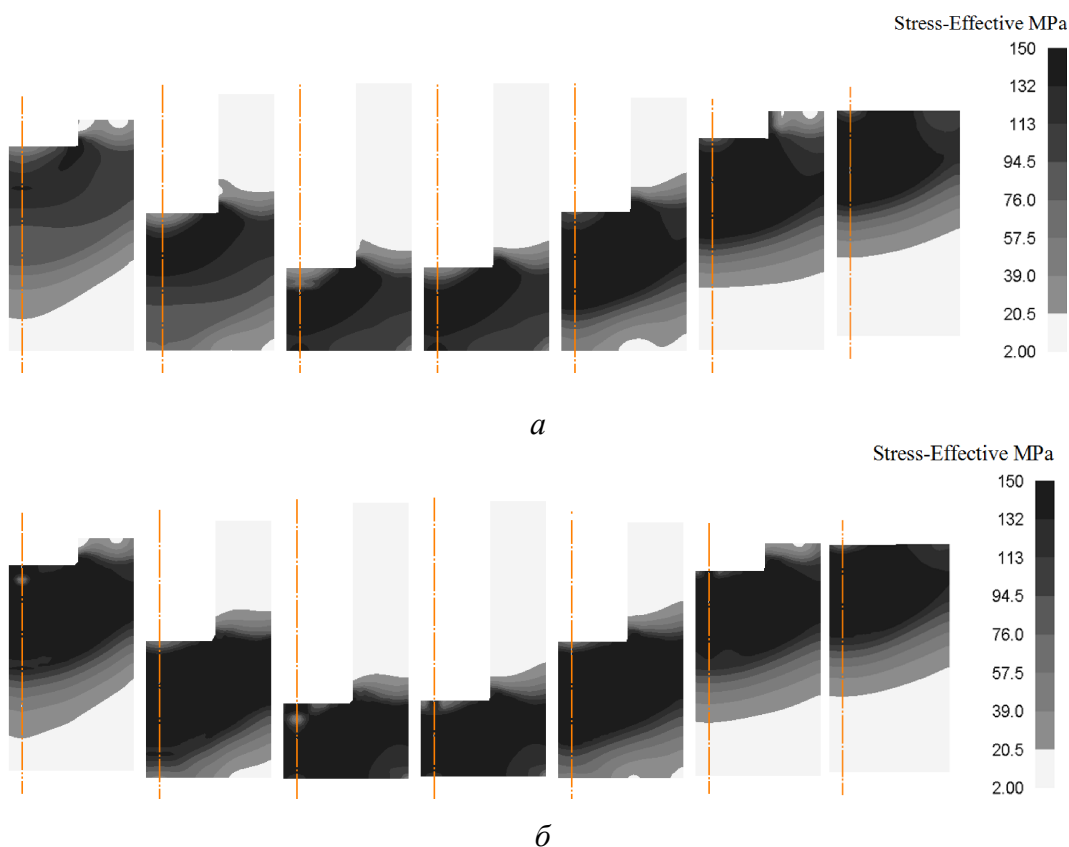


Рис. 6. Поля эквивалентного напряжения σ_{eff} по шагам первого (а) и второго (б) циклов

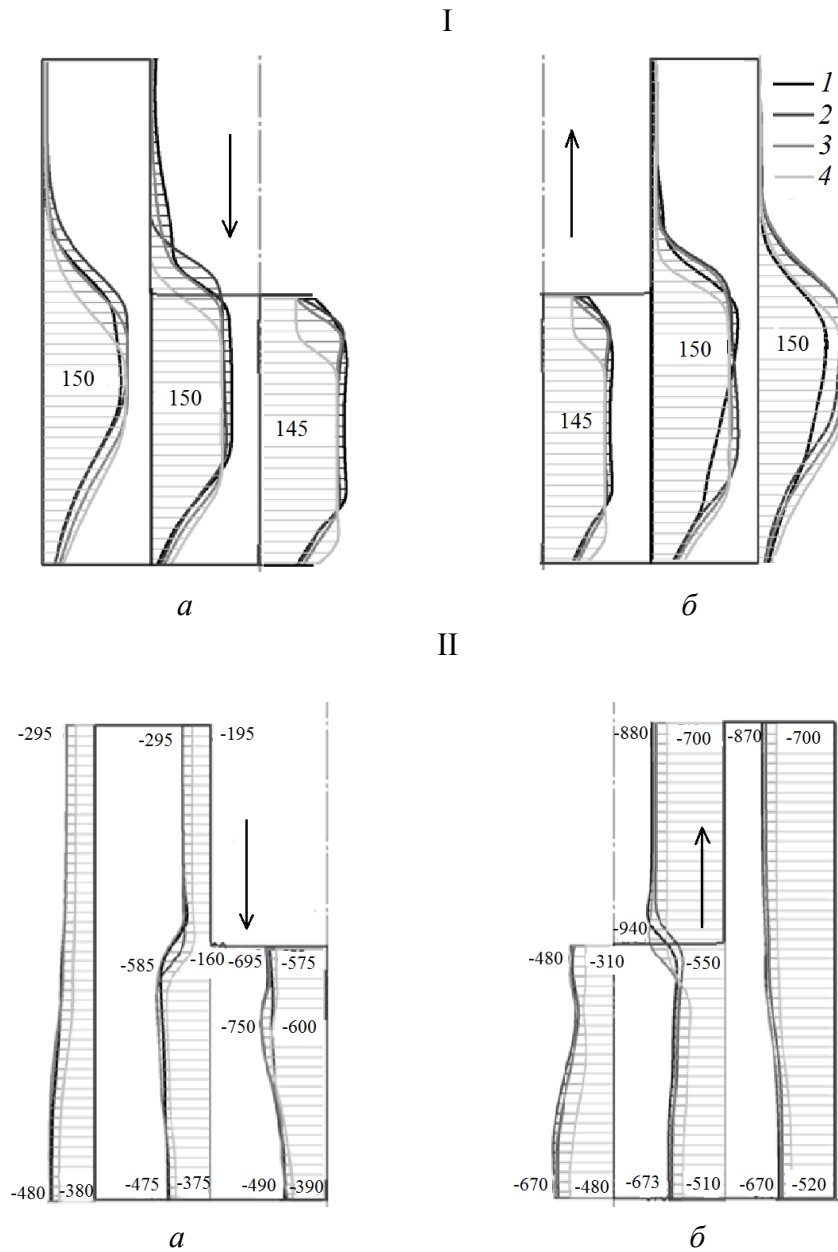


Рис. 7. Эпюры эквивалентного σ_{eff} (I) и гидростатического σ_0 (II) напряжений по циклам РЗП на стадиях установившегося течения операций: *а* – закрытой прошивки, *б* – реверсирования; 1, 2, 3, 4 – циклы деформирования

Картины распределения гидростатических напряжений σ_0 по этапам первого и второго циклов РЗП, представленные на рис. 8, показывают, что вся область заготовки находится под воздействием сжимающих напряжений. Схема всестороннего сжатия, обеспечиваемая противодавлением, благоприятствует повышению деформируемости металла, особенно в приосевой зоне заготовки, для которой характерны сверхбольшие степени деформаций. Сравнение полей σ_0 в первом и втором циклах не показало различия в характере их распределения.

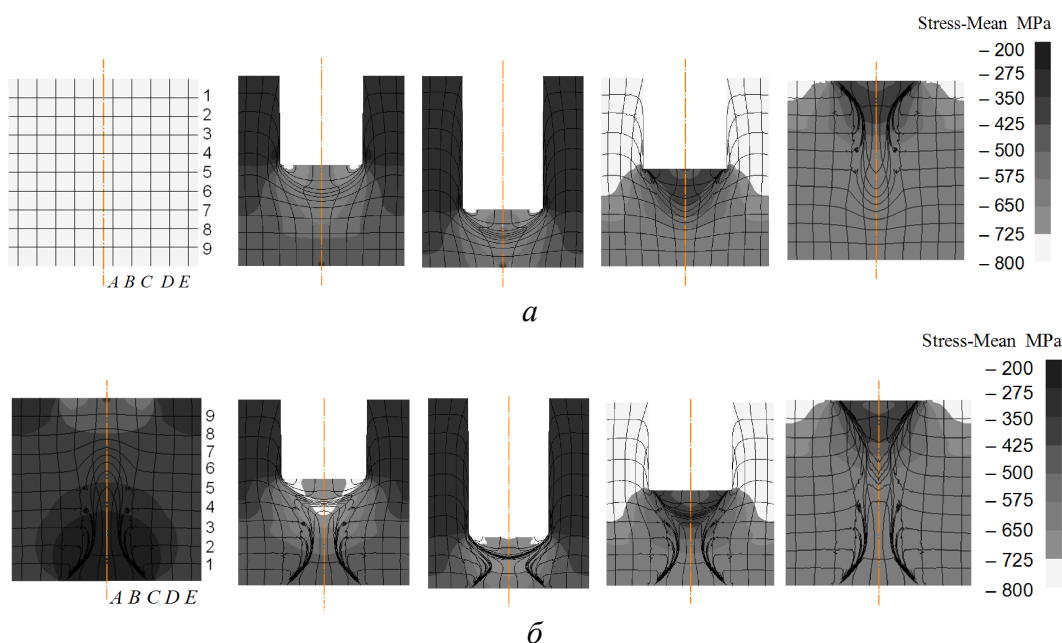


Рис. 8. Поля гидростатического напряжения σ_0 по шагам деформирования первого (а) и второго (б) циклов

Эпюры σ_0 вдоль оси симметрии, внутренней поверхности стенки выдавленного стакана и наружной поверхности заготовки в стадиях установившегося течения при ЗП и реверсировании для четырех циклов обработки приведены на рис. 7, II. При ЗП (рис. 7, II, а) гидростатическое давление достигает максимальных значений $\sigma_0 = (-600) - (-750)$ МПа в области дна внутреннего пуансона, превышая значения в периферийной области рассматриваемого сечения более чем в 3 раза. При операции реверсирования (рис. 7, II, б) зона максимальных по абсолютной величине напряжений локализована в стенке стакана, где их величина возрастает до значений $\sigma_0 = -900$ МПа. Отмечена тенденция к снижению σ_0 при переходе от первого к последующим циклам деформирования. Максимальное (до 30%) уменьшение параметра σ_0 зафиксировано в четвертом цикле. Падение гидростатического давления может негативно отразиться на деформируемости металла.

Выводы

Полученные результаты численного исследования процесса РЗП позволили установить следующее:

- величина накопленной деформации превышает уровень $\epsilon_{\text{eff}} = 6$ уже после двух циклов обработки;
- деформированное состояние заготовки неоднородно, величина эквивалентной деформации по сечению заготовки после четырех циклов обработки колеблется от 2.4 до 11 единиц;
- для всего объема заготовки характерна схема всестороннего сжатия, что благоприятствует повышению деформируемости металла;

– отмечена существенная неоднородность распределения напряжений по сечению заготовки на каждой операции РЗП; на стадиях установившегося течения операций ЗП и реверсирования значения гидростатического давления в зонах, прилежащих к деформирующим пуансонам, в 2–3 раза выше, чем на остальных участках заготовки.

Неоднородность распределения накопленной деформации вдоль оси заготовки, возрастающая от периферии к центру, делает технологию РЗП перспективной для создания архитектурного материала с изменяющимися по радиусу заготовки свойствами.

1. *Р.З. Валиев*, ФТВД 18, № 4, 12 (2008).
2. *В.В. Столяров*, Вестник научно-технического развития № 4, 29 (2013).
3. *Р.З. Валиев, Д.В. Гундеров, М.Ю. Мурашкин, И.П. Семенова*, Вестник УГАТУ № 3, 23 (2008).
4. Пат. 46999 Україна, МПК В 21 С 25/02. Спосіб зміцнення матеріалу і пристрій для його здійснення, С.Г. Синков, В.Н. Варюхін, В.Г.Синков, О.М. Сапронов, Я.Ю. Бейгельзімер; ДонФТИ НАН України – № 2001053243; Заявл. 15.05.01; Опубл. 17.06.02, Бюл. № 6.
5. *S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki*, Mater. Sci. Eng. **504**, 104 (2009).
6. *S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki, M. Naderi, Ali A. Roostaei*, Journal of Alloys and Compounds **507**, 207 (2010).
7. *S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki*, Mater. Sci. Eng. **528**, 1334 (2011).
8. *N. Haghdadadi, A. Zarei-Hanzaki, H.R. Abedi, D. Abou-Ras, M. Kawasaki, A.P. Zhi-lyayev*, Mater. Sci. Eng. **A651**, 269 (2016).
9. *С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, С.Г. Сынков*, Кузнечно-штамповочное производство № 6, 38 (2003).
10. *R.K. Islamgaliev, N.F. Yunusova, M.A. Nikitina, K.M. Nesterov*, Rev. Adv. Mater. Sci. **25**, 241 (2010).
11. *Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб*, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением № 11, 13 (2008).
12. *Ф.З. Утяшев*, ФТВД **20**, № 1, 7 (2010).
13. *В.М. Грешнов, И.В. Пучкова*, Вестник УГАТУ **13**, № 1, 146 (2009).
14. *Д.П. Кузнецов*, Вестник машиностроения № 2, 40 (1959).
15. *Л.Г. Прозоров*, Новые исследования в области кузнечной технологии. Труды ЦНИИТМАШа, Машгиз, Москва (1950).
16. *О.В. Прокофьева, С.В. Мирошниченко, Д.В. Прилепо, А.Н. Сапронов*, Вестник Луганского национального университета им. В. Даля № 2, ч. 1, 219 (2017).
17. *С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков*, Обработка материалов давлением № 2, 39 (2014).
18. *М.В. Сторожев, Е.А. Попов*, Теория обработки материалов давлением, Машиностроение, Москва (1977).
19. *Ф.З. Утяшев*, ФТВД **23**, № 1, 45 (2013).
20. *Г.И. Рааб*, ФТВД **17**, № 3, 89 (2007).
21. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).

S.V. Miroshnichenko, V.N. Varyukhin

ANALYSIS OF A COMPLEX STRESS-STRAIN STATE OF METAL INDUCED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY REVERSIBLE ENCLOSED PIERCING

The article presents the analysis of the change in the stress-strain state (SSS) during metal processing by severe plastic deformation (SPD) according to the reversible enclosed piercing (REP) scheme. The study is based on the simulation results with using the finite element complex DEFORM-2D. The features of the metal flow and evolution of severe deformation zone during multipass deformation process are revealed.

Keywords: stress-strain state, severe plastic deformation, simulation, reversible enclosed piercing

Fig. 1. Analytical model of the REP process: a – initial position of the billet, \bar{b} – enclosed piercing, \bar{e} – reversing, z – end of a cycle; 1 – inner plunger, 2 – outer plunger, 3 – die block, 4 – billet, 5 – pin knockout

Fig. 2. The strain fields ε_{eff} and coordinate grid deformation in meridional section of the workpiece: a – coordinate grid before deformation; \bar{b} , \bar{e} – enclosed piercing and reversing in the first processing cycle, respectively; z – coordinate grid after the workpiece has been turned; ∂ , e – enclosed piercing and reversing in the second processing cycle, respectively; κ , z – at the last step of the third and fourth cycles, respectively

Fig. 3. Distortion of the grid in three stages of the experiment: a – before deformation, \bar{b} – operation of enclosed piercing, \bar{e} – after reversing

Fig. 4. Distribution of the accumulative strain along the billet radius after the REP deformation

Fig. 5. The variations of calculated strain ε_2 during the REP at the points of the lines: a – 2, \bar{b} – 4, \bar{e} – 6, z – 8; I, II, III, IV – deformation cycles

Fig. 6. Fields of equivalent stresses σ_{eff} at the steps of the 1st cycle (a) and the 2nd cycle (\bar{b})

Fig. 7. Diagrams of the equivalent (I) and hydrostatic (II) stress for the cycles of the REP in the steady flow: a – enclosed piercing, \bar{b} – reversing; I, II, III, IV – deformation cycles

Fig. 8. Fields of hydrostatic stress σ_0 at the steps of the 1st cycle (a) and the 2nd cycle (\bar{b})