

УДК 621.7.011

А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко

## О НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ ОСАДКА + КРУЧЕНИЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается краткий обзор влияния больших деформаций при обработке давлением на структуру и свойства металлов. Предлагаются расчетные формулы для определения степени накопленной деформации при комбинированной осадке.

*Ключевые слова:* масштабно-структурные уровни пластической деформации, эволюция структуры, степень комбинированной деформации, степень линейной и сдвиговой деформации.

Большие пластические деформации привлекают внимание металлообработчиков и металлургов как один из способов получения сверхмелкого зерна, близкого к уровню наноструктуры  $\sim 100$  нм. С ростом степени деформации имеет место увеличение прочностных характеристик материала и некоторая потеря пластичности в результате упрочнения. Для оценки величины упрочнения и технологических возможностей материала по ресурсу пластичности возникает необходимость оценки степени накопленной пластической деформации (или интенсивности деформации)  $e_i$ .

Необходимость определения величины  $e_i$  с целью прогнозирования предельной пластичности возникает и при использовании сравнительно нового технологического процесса обработки давлением – комбинированной деформации: сжатие с осевым вращением инструмента. К нему относятся, например, процессы комбинированной осадки, обратного выдавливания, прошивки, штамповки, компактирования сыпучих сред и др. В этом случае «мягкая» схема напряженного состояния (с.н.с.) позволяет получать большую степень  $e_i$  (сочетание линейной  $e$  и сдвиговой деформации  $\gamma$ ) [1].

Оценить величину  $e_i$  при больших значениях пластической деформации путем сравнения механических свойств деформированного металла или его структуры бывает порой достаточно сложно. Дело в том, что эмпирические зависимости типа

$$\sigma = \sigma_0 + Ae^n \quad (1)$$

или физические уравнения, известные из теории дефектов кристаллической структуры [2],

$$\gamma = \rho bl, \quad (2)$$

$$k_{\text{НВ}} = \sigma \sim \sigma_0 + \alpha Gb\sqrt{\rho}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – предел прочности, МПа;  $\rho$  – плотность дислокаций,  $1/\text{см}^2$ ;  $b$  – вектор Бюргерса, см;  $l$  – длина свободного пробега дислокации, обычно не более размера зерна, см;  $G$  – модуль сдвига, МПа;  $\text{НВ}$  – твердость;  $A$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $\alpha$  – константы, из которых можно получить связь между  $\sigma$  или  $\text{НВ}$  и степенью деформации ( $e$  или  $\gamma$ ), или элементами атомной структуры справедливее скорее для начальных стадий пластической деформации для случая равномерно распределенных дислокаций и в отсутствии релаксационных эффектов. В отношении деформации монокристаллов это соответствует участку легкого скольжения ( $\rho = 10^6 \div 10^8$   $1/\text{см}^2$ ) на кривой  $\sigma(e)$ .

При больших пластических деформациях большую роль играют атомные механизмы, связанные с движением ансамбля дислокаций. При  $\rho \geq 10^{11} \dots 10^{12}$  дальнейшая деформация при «жесткой» с.н.с. приводит к разрушению, а при «мягкой» с.н.с. – не к росту плотности дислокаций, а к увеличению разориентировки между субзернами (ячейками), и имеет место уже другое соотношение

$$\sigma \sim kd^{-1/2}, \quad (4)$$

где  $d$  – размер ячейки.

Согласно [2-4], при постоянных значениях температуры и скорости деформации с увеличением  $e_i$  происходит эволюция структуры: увеличение плотности единичных дислокаций от  $\rho = 10^6$  до  $10^8$  1/см<sup>2</sup>; далее образование скоплений дислокаций в виде клубков, жгутов, сложных мультиполей ( $\rho = 10^8 \dots 10^{10}$  1/см<sup>2</sup>), затем формирование ячеистой разориентированной структуры с плотностью дислокаций на границах субзерен до  $10^{10} \dots 10^{12}$  1/см<sup>2</sup>. Происходит разбиение зерна на субзерна и их поворот, т.е. кроме трансляционного вида перемещения дислокаций вступают «в действие» ротационные моды, которые включают коллективные движения групп дислокаций, и которые именуется дисклинациями.

В работе [5] предлагаются масштабнo-структурные уровни пластической деформации при обработке давлением и соответствующие им степени деформации (осадкой)

$$e = \ln \frac{h}{h_0}, \quad (5)$$

где  $h_0$  и  $h$  – исходная и конечная высота образца:

- макроструктурный уровень (дендритно-волоконистая структура)  $e_i = 0 \dots -1,2$ ;
- микроструктурный (дислокационная структура),

$$e_i = \text{от } -1,2 \text{ до } -2,3,$$

- наноструктурный (атомно-молекулярная структура)

$$e_i = \text{от } -2,3 \text{ до } -\infty.$$

Последний уровень соответствует случаю интенсивной пластической деформации (ИПД), получаемой методами равноканального упрочнения (РКУП), осадки с кручением (КД) или всестороннейковки для получения необходимой величины укова.

На определенном этапе эволюции структуры металла общая плотность дислокаций даже начинает уменьшаться. Так, в работе [3] указывается, что при  $e > 3$  на границах полигональных ячеек, очищенных от дислокаций ( $\rho \leq 10^8$  1/см<sup>2</sup>), появляются ультрамелкие зерна на  $d \sim 0,5$  мкм. В работе В.А. Лихачева с сотрудниками [6] показано, что структура деформированных кручением медных образцов при  $t = 20^\circ\text{C}$  проходит три стадии развития, причем на второй из них (перед стадией фрагментации, завершающейся разрушением) в результате динамической рекристаллизации появляются свободные от дислокаций зерна с размером  $d \sim 5$  мкм. При этом относительная степень деформации составляла  $\sim 3000\%$ .

Отмечается эффект одновременного повышения показателей прочности и пластичности (фактически – ударной вязкости) после ИПД со сдвигом в холодном и полугорячем состояниях [7] при размере зерна от  $5 \cdot 10^{-1}$  до 1 мкм, в то время как обычно с увеличением прочности пластичность уменьшается.

В работе [8] показано, что наиболее эффективными методами накопления деформации являются деформации с наличием сдвига: деформация стесненным кручением (СК) и комбинированная деформация осадкой (КД), в меньшей степени – РКУП. В еще меньшей степени – традиционные методы обработки давлением: прокатка, волочение, растяжение.

Наличие компоненты напряжения сдвига приводит к большим степеням ротационной (немонотонной) деформации и к формированию структуры, имеющей особенности. Так, после ИПД (РКУП, СК, КД) структура зеренная, а после традиционных методов деформации, которые автор относит к квазимонотонным – структура со слаборазориентированными ячейками. Кроме того указывается, что при больших деформациях связи между деформированным и структурным состоянием не прослеживаются. Так, например, после деформации РКУП, степень деформации при которой подсчитывалась по формуле

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \beta / 2, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол пересечения каналов, и после комбинированной деформации осадки с кручением (КД), степень деформации при которой определялась по формуле

$$e_i = \frac{1}{h} \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{v^2 + \frac{\rho^2 \dot{\phi}^2}{3}} dt \quad (7)$$

где  $\rho$  – текущий радиус образца;  $\dot{\phi}$  – угловая скорость, равная  $\dot{\phi} = 2\pi n$ ;  $n$  – число оборотов в единицу времени;  $v$  – скорость осадки (пресса), размер зерна отличается незначительно (0,2...0,3 мкм и 0,1 мкм, соответственно), в то время как величина  $e_i$  отличается более, чем на порядок 12...18 против 150...600.

Одной из причин, по мнению авторов [8], является различие в оценке степени накопленной деформации, которая представляет величину скалярную. При этом не учитывается векторность свойств деформации. Структурообразование зависит не только от тензора деформации, но и от тензора ротационной составляющей или тензора поворота.

Кривая упрочнения  $\sigma - e_i$  из-за подобной эволюции структуры, конкуренции процессов упрочнения и релаксационных эффектов, особенно динамической рекристаллизации, которая при больших  $e_i$  может протекать даже при низких (комнатной) температурах и особенно в металлах с низкой энергией дефекта упаковки, не может дать однозначную зависимость между  $\sigma$  и  $e_i$ . При больших значениях  $e_i$  этой зависимости вообще нет; более того, при динамической рекристаллизации кривая  $\sigma - e_i$  имеет волнообразный вид, а при полигонизации (в металлах и сплавах с высокой энергией дефекта упаковки) с ростом  $e_i$  значение  $\sigma$  сначала растет, а затем уменьшается.

Кроме того, в формуле (1), справедливой для небольших степеней  $e$ , переменными величинами являются  $\rho$  и  $l$ , оценка которых с учетом скорости зарождения и аннигиляции дислокаций также весьма сложна, и в каждом случае производится чисто эмпирически.

Очевидно, что величина упрочнения, полученного в процессе деформации, и характер формирования структуры кроме степени деформации зависит от многих других факторов: температуры, скорости деформации, типа кристаллической решетки, энергии дефекта упаковки, ориентировки (для монокристалла). Поэтому с учетом вышесказанного, в настоящей работе не ставится задача установления жесткой связи  $e_i$  со структурой и механическими свойствами деформированного материала, а всего лишь рассматриваются разные методы оценки больших деформаций «бесструктурного» материала при совместном комбинированном нагружении осадка-кручение.

Для расчета накопленной деформации (или степени интенсивности деформации) при различных схемах нагружения используются разные соотношения. При линейной деформации сжатия-растяжения-уравнение (5), при деформации РКУП – уравнение (6). При простом сдвиге.

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta x}{y}. \quad (8)$$

При кручении стержня и при стесненном кручении (СК) степень сдвига равна

$$\gamma = \frac{\varphi r}{h}. \quad (9)$$

Иногда для сдвиговой деформации кручением используют формулу

$$\gamma = \ln \left( \frac{\varphi r}{h} \right), \quad (10)$$

где  $\varphi$  – угол закручивания,  $r$  – радиус образца.

Для сопоставления сдвиговой деформации  $\gamma$  с эквивалентной линейной  $e_{\text{экв.}}$  используют критерий Мизеса

$$e_{\text{экв.}} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{\varphi r}{\sqrt{3} h} \quad (11)$$

Последний получается из уравнения баланса работ при сдвиге и линейной деформации

$$V\sigma e = V\tau\gamma, \quad (12)$$

где  $V$  – объем образца;  $\tau$  – касательное напряжение, равное  $\frac{\sigma}{\sqrt{3}}$ .

В работе [9] компонента тензора скорости сдвиговой деформации при осадке с кручением длинного образца задается в виде

$$\dot{\gamma}_{\varphi z} = \frac{\varphi \rho}{2h}.$$

Тогда сдвиговая компонента  $\gamma_{\varphi z}$

$$\gamma_{\varphi z} = \gamma = \frac{\varphi \rho}{2h}, \quad (13)$$

где  $\rho$  – текущая величина радиуса, изменяющаяся от 0 до  $r$ .

Формулу для оценки накопленной деформации при комбинированной осадке с кручением можно получить, исходя из определения А.А. Ильюшина

$$e_i = \int_0^t \dot{e}_i dt, \quad (14)$$

где  $\dot{e}_i$  – интенсивность скорости деформации;  $t$  – время процесса деформации.

$$\dot{e}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{e}_z - \dot{e}_\rho)^2 + (\dot{e}_\rho - \dot{e}_\varphi)^2 + (\dot{e}_\varphi - \dot{e}_z)^2 + 6(\dot{\gamma}_{z\rho}^2 + \dot{\gamma}_{\rho\varphi}^2 + \dot{\gamma}_{\varphi z}^2)}. \quad (15)$$

Компоненты тензора скоростей линейной и сдвиговой деформации в цилиндрической системе координат принимаем в следующем виде [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial \left( \frac{vz}{h} \right)}{\partial z} = -\frac{v}{h} \\ \dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = \frac{\partial \left( \frac{v\rho}{2h} \right)}{\partial \rho} = -\frac{v}{2h} \\ \dot{\epsilon}_\varphi = \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = v_\rho = \frac{v}{2h} \\ \dot{\gamma}_{z\rho} = \dot{\gamma}_{\rho\varphi} = 0 \\ \gamma_{\varphi z} = \frac{\phi \rho}{2h} = \frac{2\pi n \rho}{2h} \end{array} \right. \quad (16)$$

где  $v_z = \frac{vz}{h}$ ;  $v_\rho = \frac{v\rho}{2h}$ ;  $v_\varphi = v_\rho \varphi$  – компоненты скоростей перемещения точек в направлении координат  $z, \rho, \varphi$ .

Заметим, что компонента скорости сдвига  $\dot{\gamma}_{\varphi z}$  принята в соответствии с уравнением (13). Тогда при подстановке (13) в формулу (15) для случая чистого скручивания ( $\dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_\rho = 0$ ;  $\dot{\epsilon}_\varphi \neq 0$ ) без осадки, получим формулу (11) – эквивалента сдвиговой деформации.

Компоненты скорости перемещения любой точки цилиндрического образца определялись из закона постоянства потоков в данный момент времени

$$v_z \pi \rho^2 = v_\rho 2\pi \rho \cdot z.$$

Знак (-) соответствует деформации сжатия, а (+) – деформации растяжения.

В дальнейшем имеется в виду, что  $z = h$ , тогда

$$v_z = v \text{ – скорость машины.}$$

Подставляя (16) в (15) и принимая  $\rho = r$ , получим формулу для интенсивности скорости деформации, аналогичную формуле (7)

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{1}{h} \sqrt{v^2 + 0,33 \phi^2 r^2}, \quad (17)$$

в которой переменными являются  $h$  и  $r$ .

Выражая  $r$  через  $h$ , получим

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{1}{h} \sqrt{v^2 + 0,33 \frac{\phi^2 h_0 r_0^2}{h}}. \quad (18)$$

При подстановке (18) в (14) имеем

$$\dot{\epsilon}_i = \int_0^t \frac{1}{h} \sqrt{v^2 + 0,33 \frac{\phi^2 h_0 r_0^2}{h}} dt. \quad (19)$$

Выражая величину  $dt$  через  $dh$

$$dt = -\frac{dh}{v}. \quad (20)$$

После подстановки (20) в (19), смены пределов интегрирования, преобразований и замены

$$i = \frac{v}{n} \quad (i - \text{кинematический параметр})$$

получим в общем виде уравнение

$$\dot{e}_i = - \int_{h_0}^h \frac{1}{h} \sqrt{1 + \frac{c}{h}} dh, \quad (21)$$

где постоянная величина  $c = \frac{13,15 r_0^2 h_0}{i^2}$ . (22)

Решение интеграла (21) дает

$$\dot{e}_i = 2 \left( \sqrt{\frac{h+c}{h}} - \sqrt{\frac{h_0+c}{h_0}} - \ln \frac{\sqrt{h} + \sqrt{h+c}}{\sqrt{h_0} + \sqrt{h_0+c}} \right). \quad (23)$$

Формула (24) дает значение  $e_i = e_{max}$ , то есть значение интенсивности деформации для наружной поверхности образца. Для случая  $r = 0$  постоянная  $c = 0$  и  $e_i = - \ln \frac{h}{h_0}$ .

Средняя накопленная деформация по объему образца при осадке с кручением будет зависеть от средней по объему деформации сдвига при кручении. Для деформации сдвига согласно уравнению (13) после его преобразований получим

$$d\gamma = \frac{r}{h} d\varphi = \frac{\pi r_0}{h^2/2i} dh. \quad (24)$$

После интегрирования имеем при  $r = r_0$

$$\gamma = \gamma_{max} = 2\pi \frac{r_0}{i} \left( \sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1 \right). \quad (25)$$

Средняя накопленная по объему деформация сдвига при КД определится как суммарная в объемах на элементарных участках  $d\rho$ , отнесенная к объему образца

$$\gamma_{cp} = \int_0^r \frac{2\pi \rho h \rho \varphi d\rho}{hV} = \frac{2\pi r^3 \varphi}{3V} = \frac{2}{3} \gamma_{max}. \quad (26)$$

Это означает, что средняя величина сдвига при кручении приходится на участок с радиусом  $\rho = \frac{2}{3} r_0$ .

Очевидно, чтобы найти среднюю накопленную деформацию при определении постоянной «с» в формуле (22) следует вместо  $r_0$  брать  $\frac{2}{3} r_0$ . Заметим, если при обработке давлением процесс ограничивается резервами пластичности обрабатываемого металла, то, конечно, для оценки предельного значения  $e_i$  следует использовать формулу (23) при  $\rho = r$ , так как именно с поверхности ( $\rho = r$ , то есть при  $\gamma = \gamma_{max}$ ) начинает распространяться трещина, а для оценки энергоёмкости процесса КД – формулу (26).

Для условий деформации коротких образцов  $d/h \geq 2$  и сравнительно небольших значений параметра  $i$  ( $i \leq 10$ ) второе слагаемое под корнем в уравнении (21) значительно больше 1, поэтому можно приближенно записать

$$e_i \approx - \int_{h_0}^h \frac{1}{h} \sqrt{\frac{c}{h}} dh = 2\sqrt{c} \frac{\sqrt{h_0} - \sqrt{h}}{\sqrt{h h_0}}. \quad (27)$$

После подстановки в (27) значения  $c$  из (22)

$$e_i \approx 7,22 \frac{r_0}{i} \left( \sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1 \right). \quad (28)$$

Накопленную деформацию при осадке с кручением, очевидно, можно представить в векторной форме:

$$\bar{e}_i = \bar{e} + \bar{\gamma}, \tag{29}$$

где модуль  $e$  определяется по формуле (5), а  $\gamma$  - по формуле (25). По модулю эта величина равна

$$e_i = \sqrt{e^2 + \gamma^2} = \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h}\right)^2 + 4\pi^2 \frac{r_0^2}{i^2} \left(\sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1\right)^2}. \tag{30}$$

В работе [9] для случая осадки с кручением длинномерных заготовок ( $h_0/d_0 \geq 4$ ) для оценки величины накопленной деформации дается формула

$$e_i = \frac{1}{\nu} \ln \frac{h_0}{h} \sqrt{\nu^2 + \frac{1}{3} \dot{\varphi}^2 r^2}$$

или в удобной для нашего случая форме

$$e_i = \ln \frac{h_0}{h} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 r^2}{3i^2}}. \tag{31}$$

Ее вывод, так же, как и формулы (23), производился на основе уравнений (14)...(16), но, очевидно, из-за малого соотношения  $d/h$  и малой деформации, величина  $r$  принималась постоянной.

Оценку интенсивности деформации при комбинированной осадке можно произвести, исходя из уравнения баланса энергии при условии отсутствия потерь на трение, т.е. при осадке без проскальзывания в тангенциальном направлении и при  $\tau_p = 0$ .

Считая, что средняя величина  $e_i$  эквивалентна сумме работ осевой силы  $P$  и работы крутящего момента  $M$ , напишем уравнение

$$\int_{h_0}^h P dh + \int_{\varphi_0}^{\varphi} M d\varphi = V e_i \sigma_i$$

или

$$\sigma_z V \ln \frac{h_0}{h} + \int_{\varphi_0}^{\varphi} M d\varphi = V e_i \sigma_i, \tag{32}$$

где  $\sigma_z$  — нормальное давление.

Крутящий момент при условии однозонной эпюры касательных напряжений  $\tau_\varphi = f(\rho)$

$$M = \frac{\tau_\varphi \pi d^3}{12}. \tag{33}$$

После подстановок, аналогичных ранее использованным, преобразований и решения интеграла получим

$$\sigma_z V \ln \frac{h_0}{h} + V \sigma \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \frac{d_0}{i} \left(\sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1\right) = V e_i \sigma_i$$

или

$$\sigma_z \ln \frac{h_0}{h} + \frac{\sigma 4\pi}{3\sqrt{3}} \frac{d_0}{i} \left(\sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1\right) = e_i \sigma_i. \tag{34}$$

Полагая, что  $\sigma_i \sim \sigma$ , имеем среднюю степень  $e_i$

$$e_i = \frac{\sigma_z}{\sigma_i} \ln \frac{h_0}{h} + 4,84 \frac{r_0}{i} \left(\sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1\right).$$

Максимальная степень деформации (на периферии образца) с учетом (23) будет составлять

$$e_i = \frac{\sigma_z}{\sigma_i} \ln \frac{h_0}{h} + 6,72 \frac{r_0}{i} \left( \sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1 \right). \quad (35)$$

Из уравнения пластичности, пренебрегая всеми компонентами напряжения кроме  $\sigma_z$  и  $\tau_{\varphi z}$ , следует

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{\varphi z}^2}.$$

С учетом  $\sigma_i \approx \sigma$ ; следует  $\sigma = \tau_{\varphi z} \sqrt{3}$ . Отсюда  $\sigma_z$  может изменяться от 0 до  $\sigma$ . Приняв среднее значение  $\sigma_z = 0,5\sigma$ , получим

$$e_i = 0,5 \ln \frac{h_0}{h} + 6,72 \frac{r_0}{i} \left( \sqrt{\frac{h_0}{h}} - 1 \right). \quad (36)$$

Грубую оценку правильности значений  $e_i$ , полученных из вышеприведенных формул, можно сделать, исходя из неравенства:

$$e_i' > e_i > e_i'', \quad (37)$$

где  $e_i'$  и  $e_i''$  – пределы, в которых должно находиться значение  $e_i$ ;

$e_i' = \ln \frac{h_0}{h} + \frac{\varphi r}{\sqrt{3}h}$  – степень деформации при раздельном деформировании: осадка плюс кручение;

$e_i'' = \frac{\varphi r}{\sqrt{3}h_0} + \ln \frac{h_0}{h}$  – степень деформации при раздельном деформировании: кручение плюс осадка.

В качестве примера, взяв для комбинированной осадки образец с размерами  $r_0 = 10$  мм,  $h_0 = 20$  мм, при кинематическом параметре  $i = 4$  мм/об ( $n = 2$  об/мин,  $v = 8$  мм/мин,  $c = 1628$  – const, рассмотрим, как изменяется расчетная величина  $e_i$  при  $\rho = r$  по мере уменьшения высоты  $h$ , вычисленная по вышеприведенным формулам (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные значения  $e_i$  по различным формулам

h, мм	r, мм	$\varphi$ , рад	$e = \ln \frac{h_0}{h}$	$e_i$ по (23)	$e_i$ по (28)	$e_i$ по (30)	$e_i$ по (31)	$e_i$ по (36)	Диапазон		$\sqrt{e_i' e_i''}$
									$e_i'$	$e_i''$	
20	10	0	0	0	0	0	0	0			
16	11,2	6,28	0,22	2,15	2,14	1,87	2,24	2,09	2,76	2,03	2,37
12	12,9	12,57	0,51	5,27	5,27	4,6	5,99	5,12	8,31	4,14	5,86
8	15,81	18,85	0,916	10,53	10,53	9,17	13,14	10,22	22,42	6,36	11,94
6	18,27	22,0	1,20	14,95	14,97	13,03	19,91	14,46	39,88	7,55	17,35
4	22,36	25,13	1,61	22,36	22,41	19,48	32,68	21,56	82,71	8,86	27,07
2	31,62	28,3	2,3	39,1	39,2	34,0	66	37,44	260,6	10,47	52,23

Из табл. 1 видно, что формулы (23) и (28) дают почти одинаковые значения  $e_i$ , очень близкие к ним значения дает формула (36). По формуле (30) все получающиеся значения меньше, чем по формулам (23) и (28) на постоянную величину 1,15. Формула (31) дает, по сравнению с предыдущими, завышенные значения  $e_i$ , особенно при больших степенях деформации (66 против 39,1). Все значения  $e_i$  лежат в пределах  $e_i' \dots e_i''$ , но диапазон этот очень большой. Если взять значение  $e_i = \sqrt{e_i' e_i''}$ , то разница между  $e_i$  и таковыми значениями по формулам (23), (28) не будет более 10...30% в сторону превышения (см. последний столбец в таблице). Большие расхождения (30%) относятся к большим степеням деформации.

Таким образом, наиболее достоверными для данных геометрических и кинематических параметров процесса КД следует считать расчетные значения  $e_i$ , полученные по формулам (23), (28) и (36), из которых следует прямая зависимость  $e_i$  от числа оборотов. Из графика  $e_i$  от  $e = \ln \frac{h_0}{h}$  (рис.1), построенного по данным таблицы, видно, насколько эффективен процесс комбинированной осадки без проскальзывания в тангенциальном направлении с точки зрения роста степени накопленной деформации по сравнению с осадкой обычной и другими способами деформации, например, прокатки. Например, степени деформации обычной осадки  $e = \ln \frac{h_0}{h} = 2$  соответствует фактически  $e_i$  превышающаяся  $e$  в 15 раз. При больших значениях  $e$  эта разница будет еще больше. Согласно классификации [5] наноструктурный уровень можно получить при КД без проскальзывания инструмента по торцовым поверхностям образца уже при  $e = \ln \frac{h}{h_0} = 0,51$  при угле закручивания  $\varphi = 4\pi$ . Следует заметить, что проскальзывание, приводя к нагреву образца, может привести к динамической рекристаллизации и росту зерна.

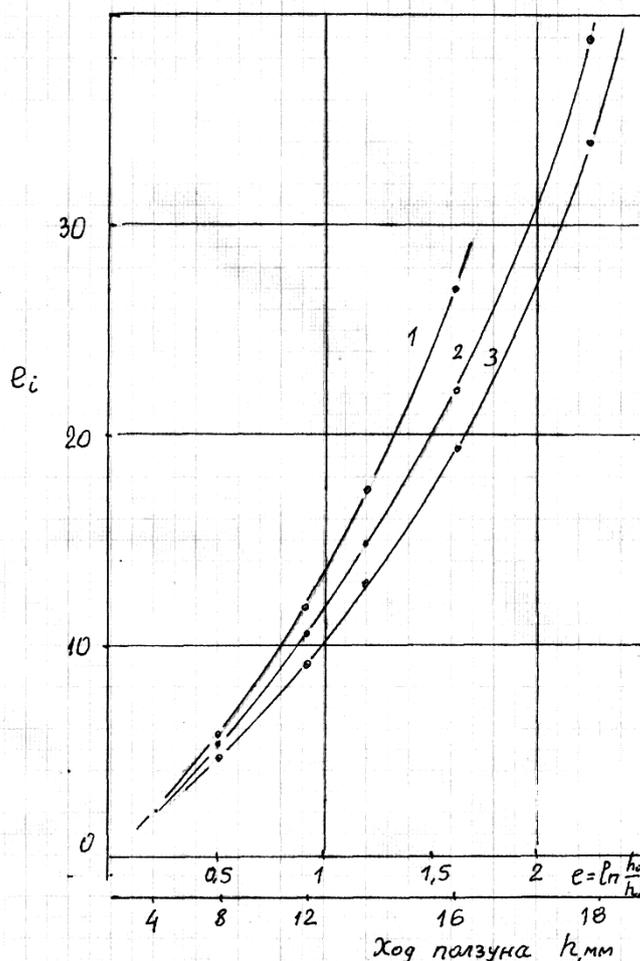


Рис. 1. Зависимость интенсивности деформации  $e_i$  от  $e_{oc}$  при комбинированной деформации образца  $\sigma 20 \times 20$  при  $i = 4$  мм/об; расчет по формулам: 1)  $e_i = \sqrt{e'_i e''_i}$ ; 2) (23) и (28); 3) (30)

**Библиографический список**

1. **Шнейберг, А.М.** Экспериментальные исследования предельной пластичности при осадке без кручения и с кручением / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, Д.А. Щербатов. – М., КШП и ОМД, 2012. № 1. С. 18–24.
2. **Владимиров, В.И.** Физическая теория пластичности и прочности. Конспект лекции в 2-х частях / В.И. Владимиров. – Л., 1975.
3. **Рыбин, В.В.** Большие пластические деформации и разрушение металлов / В.В. Рыбин. – М.: Metallurgia, 1986. – 224 с.
4. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин [и др.]. – Новосибирск, Наука, 1990. – 225 с.
5. **Онищенко, А.К.** Интенсивная, мегапластическая и псевдопластическая (мезо) деформация. – М., КШП и ОМД, 2013. № 2. С. 16–21.
6. **Быков, В.М.** Фрагментирование и динамическая рекристаллизация в меди при больших и очень больших пластических деформациях / В.М. Быков [и др.] // ФММ. 1990. Т. 45. № 4. С. 163–169.
7. **Чувильдеев, В.Н.** О предельной прочности и пластичности / В.Н. Чувильдеев [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2011. № 1. С. 2–12.
8. **Утяшев, Ф.З.** Связь между деформированным и структурным состоянием металла при интенсивной пластической деформации. – М., КШП и ОМД, 2011. № 5. С. 33–36.
9. **Хван, В.Д.** Устройство для осадки с кручением длинномерных цилиндрических заготовок / В.Д. Хван, А.А. Воропаев // Техника машиностроения. – Воронеж. 1999. № 3 (31).

*Дата поступления  
в редакцию 11.12.2014*

**A. M. Schneiberg, F. P. Mikhailenko**

**CUMULATIVE DEFORMATION AT COMBINED UPSET-TORSION LOADING**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

A brief overview is given on the effect of large deformations on structures and properties of metals at pressure shaping. Formulae for calculating of a degree of cumulative deformation at combined upsetting are suggested.

*Key words:* scale and structure degrees of plastic deformation, structure evolution, combined deformation degree, linear and shearing deformation degree.