

УДК 621.771(075.8)

А.А. Богатов, И.В. Лещев

Уральский федеральный университет

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В настоящее время равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из основных способов получения объемных металлических наноматериалов [1]. Большое внимание современных ученых направлено на изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) металла при РКУП, а также расчета количества проходов прессования, силовых и скоростных параметров процесса [1, 3].

В работе на основе предшествующих исследований по НДС при РКУП особое внимание уделяется исследованию разрушения металла и оценке поврежденности в зависимости от формы инструмента и условий прессования.

Рассмотрим пластическое течение материала, продавливаемого через два пересекающихся канала равного поперечного сечения в условиях плоской деформации (рис. 1, а). Течение металла происходит за счет перемещения пресс-штемпеля I . Точное решение задачи дается полем линий скольжения и соответствующим ему годографом скоростей, показанным на рис. 1, а. Области материала I и III перемещаются в каналах с равными скоростями v как жесткие; область AO_1B также остается жесткой. Пластическая область II образована центрированным веером, в котором α -линии сколь-

жения являются дугами окружности с центром в точке O , а β -линии скольжения радиусами, сходящимися в точку O . Геометрия поля определяется углом разворота центрированного веера, величина которого зависит от условий трения на контактной поверхности:

$$\alpha = \arccos \frac{\tau_k}{\tau_s} - 2\beta, \left(\frac{\tau_k}{\tau_s} > \cos 2\beta \right),$$

где τ_k – контактное трение на стенках канала, 2β – угол между осями каналов.

Геометрия пластической области определялась из соображений ее прямой зависимости от коэффициента трения между инструментом и продавливаемым материалом (чем больше коэффициент трения, тем больше жесткая «застойная» область AO_1B). Для детального анализа воспользуемся двумя предельными случаями, которые представляют наибольший практический интерес [1].

Первый из них имеет место при $\tau_k \leq \tau_s \cos 2\beta$, когда $\alpha = 0$, а пластическая область AOB вырождается в прямую линию скольжения OO_1 , совпадающую с биссектрисой угла 2β между осями каналов (рис. 1, б). Из соответствующего годографа скоростей имеем, что

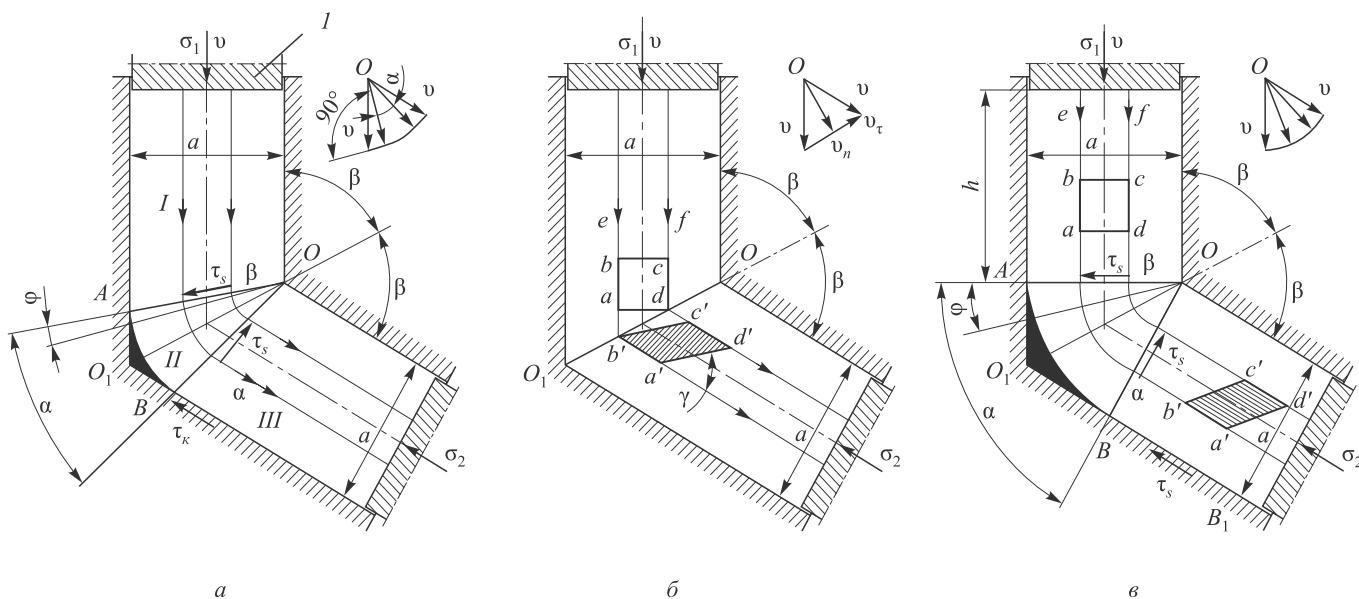


Рис. 1. Поле линий скольжения при прессовании в пересекающихся каналах:
а – общий случай; б – $\tau_k = 0$; в – $\tau_k = \tau_s$

нормальная и касательная компоненты скорости на OO_1 равны соответственно:

$$v_n = v \sin \beta; \quad |v_\tau| = v \cos \beta.$$

На линии разрыва скоростей OO_1 частицы материала деформируются простым сдвигом и направление их движения изменяется скачком [1]. Накопленная степень деформации сдвига Λ при этом будет равна

$$\Lambda = \frac{|v_\tau|}{v_n} = 2 \operatorname{ctg} \beta.$$

На рис. 1, б показаны линии тока e и f и геометрия искажения элемента материала путем простого сдвига по линии OO_1 [1].

Вдоль OO_1 действуют максимальные касательные напряжения τ_s и среднее нормальное напряжение σ , трением на инструменте пренебрегаем ($\tau_k = 0$):

$$\sigma = \sigma_2 + \tau_s \operatorname{ctg} \beta,$$

где σ_2 – противодавление.

Отсюда рабочее давление на прессующем пуансоне l равно

$$\sigma_1 = \sigma_2 + 2\tau_s \operatorname{ctg} \beta.$$

Для случая без трения очевидно, что напряженное и деформированное состояние при равноканальном пресовании реализуется в бесконечно тонкой области простого сдвига OO_1 , является однородным и полностью определяется углом β и противодавлением σ_2 , выбор которых позволяет варьировать параметры процесса в достаточно широком диапазоне.

Рассмотрим второй предельный случай, при котором $\tau_k = \tau_s$, а жестко-пластические границы AO и BO перпендикулярны стенкам каналов. Угол разворота центрированного веера (рис. 1, в) при этом равен $\alpha = \pi - 2\beta$.

На границах AO и BO скорости непрерывны, а в области AOB линии тока совпадают с α -линиями скольжения, вдоль которых скорость течения сохраняется постоянной [1]. Проекция скоростей на направления линий скольжения будут равны $v_\alpha = v$; $v_\beta = 0$.

Степень деформации сдвига (учитывая интенсивность скорости деформации $H = v/r$ и приращение времени при движении в пластической области $dt = rd\varphi/v$) численно равна углу поворота частицы, выраженному в радианах

$$\Delta\Lambda = \int H dt = \varphi,$$

где φ лежит в пределах от 0 до $\pi - 2\beta$.

Полное приращение степени деформации сдвига в таком случае будет равно $\Lambda = \alpha = \pi - 2\beta$.

После пластической деформации в зоне AOB плоскости сдвига остаются параллельными оси канала, а

деформированное состояние является однородным и соответствует простому сдвигу вдоль α -линий скольжения.

Напряженное состояние в пластической области с применением противодавления σ_2 в данном случае выглядит так:

$$\sigma_{OB} = \tau_s + \sigma_2; \quad \sigma = \sigma_{AOB} = \tau_s(1 + 2\alpha - 2\varphi) + \sigma_2;$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \tau_s(1 + 2\alpha) + \frac{2\tau_s h}{a}.$$

Второй член в последней формуле учитывает трение входного канала длиной h и шириной a [1].

Для проверки метода линий скольжения произведем расчет напряжений по основному энергетическому тождеству (метод верхней оценки) и покажем, что полученные результаты будут совпадать с ранее приведенным методом линий скольжения. Из основного энергетического тождества определяется напряжение пресования σ_1 : $\sigma_1 av = \sigma_2 av + \tau_s(1 + 2\alpha)av + 2\tau_s hv$ – для случая с максимальными напряжениями трения; $\sigma_1 av = \sigma_2 av + 2\tau_s \frac{a}{\sin \beta} v \cos \beta$ – для случая без трения.

Очевидно, что в обоих случаях решения совпадают.

Комбинируя решения в двух предельных случаях, нетрудно рассмотреть и общий случай, соответствующий рис. 1, а. Деформированное состояние будет складываться из последовательности простых сдвигов в направлении β и $-\beta$ по линиям разрыва скоростей AO и BO и вдоль α -линий скольжения в области ABO , а полное приращение степени деформации сдвига равно

$$\Lambda = \alpha + 4 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) [1].$$

Напряженное состояние в общем случае будет выглядеть так:

$$\sigma_{OB} = \tau_s \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + \sigma_2;$$

$$\sigma = \sigma_{AOB} = \tau_s \left(2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + 2\alpha - 2\varphi \right) + \psi \tau_s \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + \sigma_2;$$

$$\sigma_1 = \tau_s \left(4 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + 2\alpha - 2\varphi \right) + 2\psi \tau_s \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + \frac{h}{a} \right] + \sigma_2.$$

В приведенных выражениях коэффициент трения ψ (трение учитывается по методу Зибеля $\tau_k = \psi \tau_s$) выражается через углы α и β : $\alpha = \arccos(\psi) - 2\beta$ при $\psi = \frac{\tau_k}{\tau_s} > \cos 2\beta$.

Итак, в общем случае (рис. 1, а) среднее гидроста-

тическое напряжение σ , также как и напряжение прессования σ_1 , является сложной функцией, зависящей от нескольких переменных ($\psi, \alpha, \beta, \sigma_2$), геометрии каналов (h/a), а также свойств исследуемого материала (τ_s).

Разрушение материала – это разделение тела на части, либо появление макроскопической, видимой невооруженным взглядом, трещины или поры. Физика этого процесса связана с изучением механизмов зарождения, развития, а также «залечивания» микротрещин, микропор. В механике деформируемого тела развивается феноменологическая теория исследования процесса разрушения, исходя из которой разрушение материала характеризуется поврежденностью ω , скалярной величиной, лежащей в пределах от 0 до 1 ($\omega = 1$ соответствует появлению видимой невооруженным глазом макроскопической трещины, тогда как $\omega = 0$ – исходному состоянию материала до деформации) [2]. В работе ставится задача оценить поврежденность идеально пластического материала ω при РКУП. Для этого воспользуемся моделью накопления поврежденности металла при монотонной деформации по методике [2]:

$$\omega = \int_0^{\Lambda_p} \frac{a \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda,$$

где $\Lambda_p = \chi \exp\left(\lambda \frac{\sigma}{T}\right)$ – степень деформации сдвига, накопленная материальной частицей металла от момента возникновения пластической деформации до момента появления макротрещины (описывается аппроксимированной формулой из диаграммы пластичности (рис. 2); $a = a_0^{1+b\frac{\sigma}{T}}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность накопления поврежденности материала (он зависит, также как и пластичность Λ_p , от термомеханических параметров процесса $\sigma/T, \mu_\sigma, H, \theta$); σ/T – показатель напряженного состояния; χ, λ, b, a_0 – коэффициенты, зависящие от марки стали или сплава

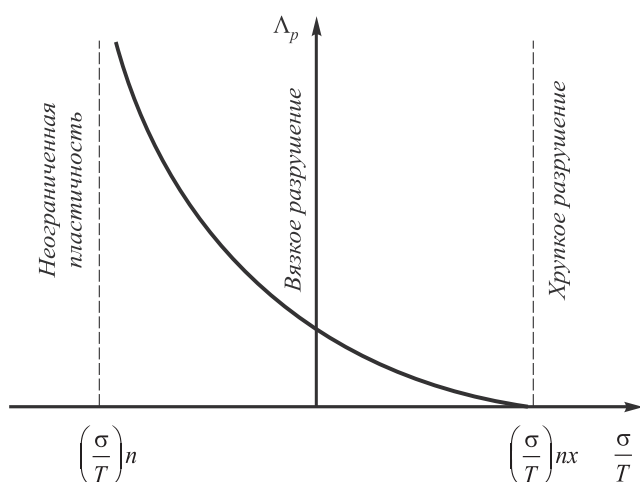


Рис. 2. Диаграмма пластичности

(их находят, используя опытные данные, по методу наименьших квадратов) [2].

Для первого предельного случая ($\tau_k = 0$) при $\sigma/T = \text{const}$ (процесс деформации и накопления поврежденности осуществляется мгновенно) формула для нахождения поврежденности упрощается:

$$\omega = \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_p} \right)^a.$$

Тогда получим следующие результаты:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\sigma_2}{\tau_s} + \text{ctg}\beta; \quad \Lambda_p = \chi \exp \left[\lambda \left(\frac{\sigma_2}{\tau_s} + \text{ctg}\beta \right) \right];$$

$$\omega = \left(\frac{2 \text{ctg}\beta}{\chi \exp \left[\lambda \left(\frac{\sigma_2}{\tau_s} + \text{ctg}\beta \right) \right]} \right)^a.$$

Нетрудно заметить, что поврежденность ω материала при РКУП зависит лишь от полуугла между осями каналов β , противодавления σ_2 и констант исследуемого материала χ, λ и a_0 . В таком предельном случае происходит мгновенное накопление поврежденности материала на линии OO_1 , так как вся деформация сосредоточена на этом участке.

Для второго предельного случая при максимальном напряжении трения $\tau_k = \tau_s$ получим несколько другие результаты

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\sigma_2}{\tau_s} + 1 + 2\pi - 4\beta - 2\varphi;$$

$$\Lambda_p = \chi \exp \left[\lambda \left(\frac{\sigma_2}{\tau_s} + 1 + 2\pi - 4\beta - 2\varphi \right) \right];$$

$$\omega = \left(\frac{\varphi}{\chi \exp \left[\lambda \left(\frac{\sigma_2}{\tau_s} + 1 + 2\pi - 4\beta - 2\varphi \right) \right]} \right)^a.$$

Поврежденность ω металла накапливается постепенно, возрастая при движении металла в пластической области ABO от границы разрыва скоростей AO к границе BO . Поэтому поврежденность материала ω в предельном случае с максимальным трением, кроме полуугла между осями каналов β , противодавления σ_2 и констант исследуемого материала χ, λ и a_0 , зависит от положения частиц исследуемого материала в пластической области (т.е. от угла φ).

И, наконец, обобщенные результаты (рис. 1, а):

$$\frac{\sigma}{T} = \left(2 \text{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + 2\alpha - 2\varphi \right) + \psi \text{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + \frac{\sigma_2}{\tau_s};$$

$$\Lambda_p = \chi \exp \left[\lambda \frac{\sigma}{T} \right]; \quad \omega = \int_0^{\Lambda_1} \frac{a \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda.$$

Важно заметить, что для процесса получения ультрамелкозернистой структуры в металле нельзя допустить даже микроразрушения ($\omega \approx 0,25$), не говоря уже о макроразрушении ($\omega = 1$). Для этого необходимо воспользоваться критерием поврежденности материала $\omega < \omega^* = 0,25$, при котором при рекристаллизации после пластической деформации РКУП полностью происходит «залечивание» микропор и микротрещин в металле без потери механических и технологических свойств.

Процесс равноканального углового прессования не только очень удобен для изучения свойств материала при интенсивной пластической деформации, но и при специально подобранных характеристиках и условиях процесса позволяет достичь неограниченной пластичности исследуемого материала (см. рис. 2).

Выводы. Приведена механика деформирования материала при равноканальном угловом прессовании, показаны и описаны напряженное и деформированное состояние материала. Особенностью такого процесса является деформация простым сдвигом.

Исследовано разрушение материала при РКУП, характер накопления поврежденности в процессе пластической деформации. Сформулированы критерии и предельные случаи, при которых возможен процесс РКУП без разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. // Металлы. 1981. № 1. С. 115 – 123.
2. Богатов А.А. Механические свойства и методы разрушения металлов: Учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
3. Бережной В.Л. // КИП. ОМД. 2010. № 1. С. 7 – 14.

© 2012 г. А.А. Богатов, И.В. Лецев
Поступила 12 января 2011 г.

УДК 669.14

В.В. Аникеев, Н.Н. Зонненберг, В.И. Никитин

Самарский государственный технический университет

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ШИХТЫ СО СВОЙСТВАМИ И РАСХОДОМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ ПРИ ПЛАВКЕ СТАЛИ

В сталеплавильном производстве основными составляющими шихты являются черные и вторичные (покупной лом) металлы, а также возврат собственного производства (ВСП).

Известно, что состав и качество шихтовых материалов определяют структуру и свойства литого и деформированного металла, а также влияют на расход энергоносителей при плавке стали [1 – 3].

Если качество покупного лома регламентируется техническими условиями по ГОСТ 2787-75, то контроль качества ВСП (прибыли, литники, сливы, сплесы) не проводится.

Влияние состава шихты на качество отливок из стали 35Л, 35ГЛ, 12Х18Н9ТЛ и сортового проката из непрерывнолитых заготовок стали 35ГС оценивали по результатам механических испытаний на относительное удлинение δ , пределы прочности σ_b и текучести σ_t , ударную вязкость КСУ; на образование трещин и стойкость к межкристаллитной коррозии (сталь 12Х18Н9ТЛ).

Исследование влияния состава и качества шихты на расход энергоносителей (электроэнергия, кислород, природный газ, аргон) проводили при плавке стали 35ГС, 1сп, 5сп в дуговой сталеплавильной печи ДСП-120 (расплавление шихты) с последующей обработкой расплава на установке ковш-печь (УКП). Металл разливали

на машине непрерывного литья в заготовки сечением 125×125 мм, которые в дальнейшем прокатывали на сорт.

Сталь для изготовления отливок плавил в ДСП-1,5 (35Л, 35ГЛ) и в индукционной печи ИСТ-0,4 (12Х18Н9ТЛ). Отливки получали в песчано-глинистых формах, масса отливок 20 – 750 кг.

Варианты исследованных составов шихт представлены в табл. 1.

Характеристика лома по ГОСТ 2787-75 «Металлы черные, вторичные» приведена ниже:

Марка лома	Состав лома
2А	Кусковые лом и отходы, шихтовые слитки. Не допускаются проволока и изделия из проволоки
3А	Кусковые лом, отходы и стальной скрап, рулоны листового металла, двутавры, швеллера. Не допускаются проволока и изделия из проволоки
4А	Мелкие кусковые отходы и лом изделий метизного производства (болты, гайки и пр.). Не допускаются проволока и изделия из проволоки
8А	Пакеты высокой плотности из легковесных стальных отходов и лома. Допускается стружка. Не допускается прессование эмалированного и оцинкованного металла