

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.774.352

DOI: 10.14529/met150413

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ ЗАГОТОВКИ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ

И.В. Лещев, А.А. Богатов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Важной задачей современного производства металлопродукции является разработка и освоение новых технологических процессов обработки давлением, сочетающих незначительное изменение формы и размеров заготовки с интенсивной проработкой структуры при деформации. Этим требованиям отвечает процесс равноканального углового прессования (РКУП). В работе выполнен анализ влияния технологических режимов равноканального углового прессования на форму очага деформации, интенсивность скорости деформации, степень накопленной деформации, показатели напряженного состояния и поврежденность металла с идеально пластическими свойствами и со степенным упрочнением. Механика равноканального углового прессования рассмотрена с помощью методов линий скольжения и верхней оценки, а расчет поврежденности металла выполнен на основе механики вязкого разрушения металла при обработке давлением. Найдены закономерности ведения процесса РКУП, рациональные режимы деформирования. Полученные факты подтверждены результатами, достигнутыми при моделировании процесса РКУП в программном комплексе Deform-3D. В работе выявлены новые направления исследования процесса равноканального углового прессования, связанные с измельчением зерна и изучением процесса разрушения металла. В частности, регулируя скорость деформации процесса и контролируя температуру заготовки, можно обеспечивать такие условия, при которых в материале заготовки в полной мере проходят процессы полигонизации, формируются новые центры рекристаллизации, подавляются процессы рекристаллизации неподготовленной структуры металла (первичной рекристаллизации) и создаются условия для измельчения зерна и получения ультрадисперсной структуры металла. Вычислительный эксперимент, проведенный с помощью программного комплекса Deform-3D, с достаточной точностью подтверждает теоретические исследования РКУП методом верхней оценки и линий скольжения.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование; линии скольжения; поврежденность; разрушение; рациональные режимы деформирования; Deform-3D; рекристаллизация; полигонизация; ультрадисперсная микроструктура.

Одной из характерных особенностей современного металлургического производства является тенденция к ужесточению требований к качеству готовой продукции и повышению ее эксплуатационной надежности и долговечности. Актуальными направлениями развития металлургического производства являются:

- получение сталей и сплавов заданного химического состава, макро- и микроструктуры, уровня механических свойств и долговечности изделий в определенных условиях эксплуатации;
- получение изделий требуемой формы, ассортимента, точности размеров и чистоты поверхности;
- минимизация производственных затрат при удовлетворении ограничительных требований к качеству продукции, указанных в нормативно-технической документации;

Важной задачей является разработка и освоение новых технологических процессов обработки давлением, сочетающих незначительное изменение формы и размеров заготовки с интенсивной проработкой структуры при деформации. Этим требованиям отвечает процесс равноканального углового прессования (РКУП). Процесс РКУП довольно широко описан в литературе [1–11], однако в связи с поставленной задачей выявлены новые направления исследования процесса равноканального углового прессования, связанные с достижением максимального упрочнения металла, измельчением зерна, а также изучением процесса разрушения металла.

Механика напряженно-деформированного состояния и разрушения металла при РКУП
Напряженное состояние в общем случае описывается следующими уравнениями:

$$\Lambda = \alpha + 4 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right);$$

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

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

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

$$\sigma_1 = \tau_s \left(4 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + 2\alpha - 2\varphi \right) +$$

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

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 $\psi = \frac{\tau_k}{\tau_s} > \cos 2\beta$ [1].

Для оценки поврежденности металла при РКУП воспользуемся моделью накопления поврежденности металла при монотонной деформации по методике [12]:

$$\omega = \int_0^{\Lambda_1} \frac{a \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda,$$

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; $a = a_0^{1+b \frac{\sigma}{T}}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность накопления поврежденности материала (он зависит, также как и пластич-

ность Λ_p , от термомеханических параметров процесса $\frac{\sigma}{T}$, μ_σ , N , θ); $\frac{\sigma}{T}$ – показатель напряженного состояния; χ , λ , b , a_0 – коэффициенты, зависящие от марки стали или сплава (их находят, используя опытные данные, по методу наименьших квадратов) [12].

Условия деформирования металла при РКУП

Для большинства процессов высокотемпературной обработки металлов давлением характерным является равновесный процесс деформации. С точки зрения феноменологической теории на основе высказанной Ю.М. Вайнблатом гипотезы о том, что при достижении некоторой критической деформации процесс становится равновесным. В таком случае решающее значение на эволюцию зеренной структуры, а, следовательно, и на механические и технологические свойства оказывают температурно-скоростные условия деформации, а не степень деформации. Простое соотношение, связывающее температуру и скорость деформации, можно получить, введя время разупрочнения t как параметр, влияющий на сопротивление деформации при горячей обработке:

$$\left[\frac{d\sigma_s}{dt} \right] \left[\frac{dt}{d\varepsilon_{ii}} \right] = \frac{k}{\xi_{ii} \exp \left[-\frac{Q}{R\theta} \right]}.$$

Для процесса горячей обработки металла давлением уравнение состояния, связывающее сопротивление деформации в установившейся стадии σ_s , скорость деформации ξ_{ii} и температуру θ , можно представить выражением

$$\xi_{ii} = \Lambda_1 \exp(\beta \sigma_s) \cdot \exp \left[-\frac{Q}{R\theta} \right] \quad [13, 14].$$

Таким образом, задача обеспечения максимального упрочнения в условиях равновесности

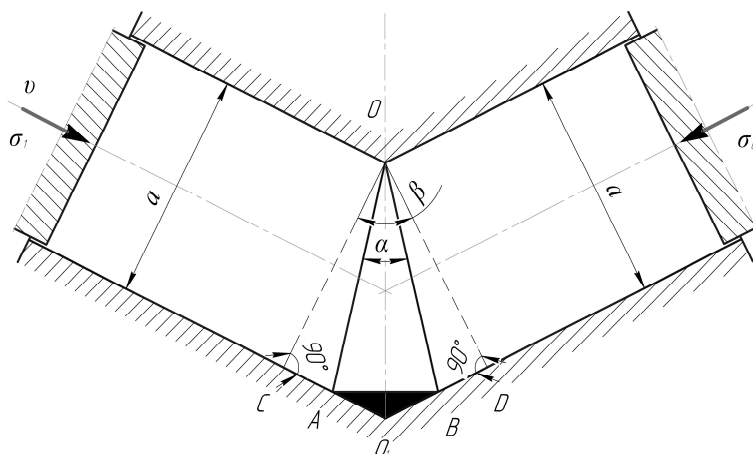


Рис. 1. Схема равноканального углового прессования: AOB – геометрический очаг деформации, зона пластического течения; AO, B – застойная зона

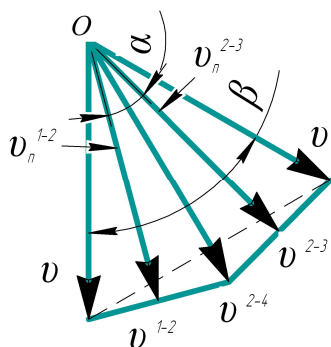


Рис. 2. Годограф скоростей: v_n^{1-2} , v_n^{2-3} – нормальные составляющие скоростей течения металла; v^{1-2} , v^{2-3} , v^{2-4} – касательные составляющие скоростей течения металла, скорости среза

процесса РКУП сводится к выбору необходимой температуры предварительного нагрева заготовки и увеличения скорости деформации $\xi_{и} \rightarrow \infty$, это условие может быть достигнуто лишь в случае, когда $\alpha \rightarrow 0$ (рис. 1), то есть размер пластической области должен быть минимальным.

Для определения оптимальных условий деформирования при РКУП воспользуемся методом верхней оценки использованием кинематических моделей очага деформации из жестких блоков. Использование принципа виртуальных скоростей позволило построить годограф скоростей, из анализа которого (рис. 2) был составлен функционал принципа возможных изменений деформированного состояния, вычислена первая производная функционала по варьируемому параметру α :

$$I = \int_V \tau_s \cdot HdV - \int_S p_i \cdot v_i dS \text{ и } \frac{dI}{d\alpha} = 0.$$

Здесь $\int_V \tau_s \cdot HdV$ – мощность внутренних сил (мощность деформации); $\int_S p_i \cdot v_i dS$ – мощность внешних воздействий на исследуемый материал.

Результатом упрощения уравнения стала зависимость угла α от угла поворота каналов β при различных коэффициентах трения ψ (рис. 3):

$$\frac{\psi + 1}{\cos^2 \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right)} = \frac{2}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Из условия минимизации угла α результатом выбора оптимальных режимов деформирования является:

- 1) выбор конфигурации каналов при равноканальном угловом прессовании (угол поворота каналов β);
- 2) при соответствующей конфигурации кана-

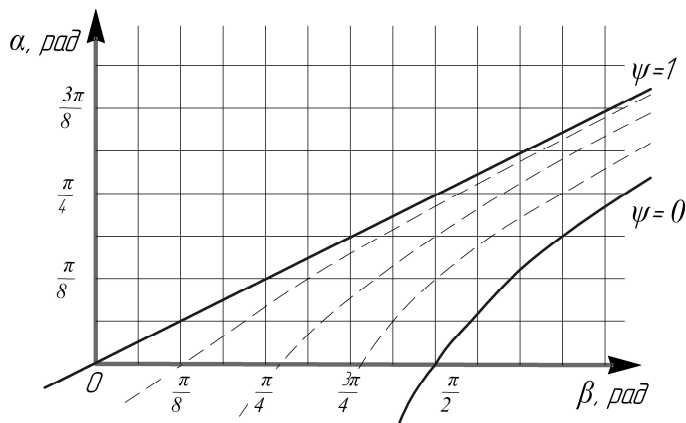


Рис. 3. Зависимость угла α от угла поворота каналов β : α – угол, описывающий пластическую область; β – угол поворота каналов, ψ – коэффициент трения по Зибелю

лов подбор необходимой смазки для обеспечения необходимого коэффициента трения ψ ;

- 3) при $\alpha \rightarrow 0$, $\psi = \cos \beta$.

Выбор рациональных режимов деформирования при РКУП с учетом упрочнения и поврежденности металла

Для учета упрочнения воспользуемся формулой

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + g \Lambda_i^b,$$

где g и b – экспериментальные коэффициенты соответствующего материала (стали или сплава) [15]; зависимость $\beta(\psi)$ при условии $\alpha \rightarrow 0$ для различных материалов показана на рис. 4.

Пользуясь графиком (см. рис. 4) для определенного материала, можно осуществить выбор оптимального режима деформирования при соответствующем коэффициенте трения.

Важно заметить, что для процесса получения ультрадисперсной микроструктуры и, как следствие, высоких механических и эксплуатационных свойств металла после РКУП, недопустимо даже микроразрушение ($\omega \approx 0,25$), не говоря уже о макроразрушении ($\omega = 1$) [12]. При $\omega < \omega^* = 0,25$ достигаются условия недопустимости появления микродефектов. По результатам выбора оптимальных режимов деформации при условии $\alpha \rightarrow 0$ осуществим проверку по поврежденности металла. На рис. 5 графически приведена зависимость поврежденности металла ω от угла поворота каналов β при соответствующих оптимальным режимам деформации коэффициентах трения ψ (см. рис. 4).

Результат наглядно показывает, что при оптимальных режимах деформации РКУП стали (сплава) поврежденность ω находится в пределах допустимых значений ($\omega < 0,25$). Таким образом, представленные режимы деформации при РКУП позволяют осуществлять процесс пластической деформации для выбранных материалов без разрушения.

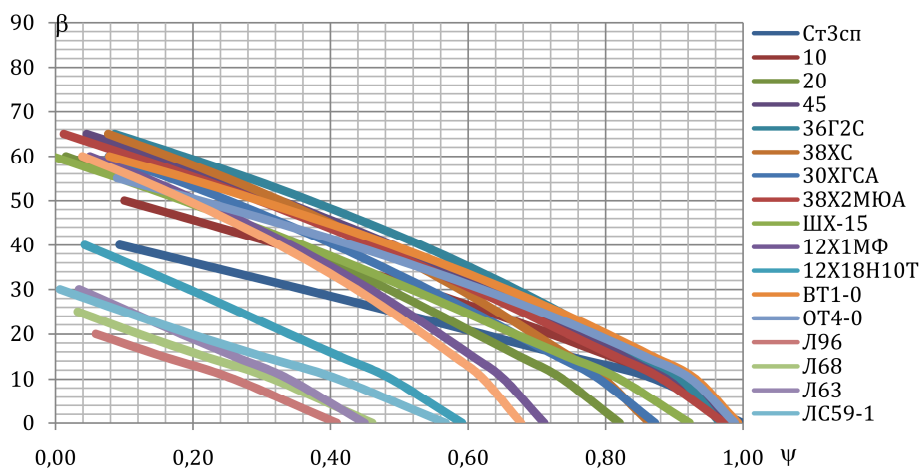


Рис. 4. Зависимость угла поворота каналов β от коэффициента трения ψ для различных материалов

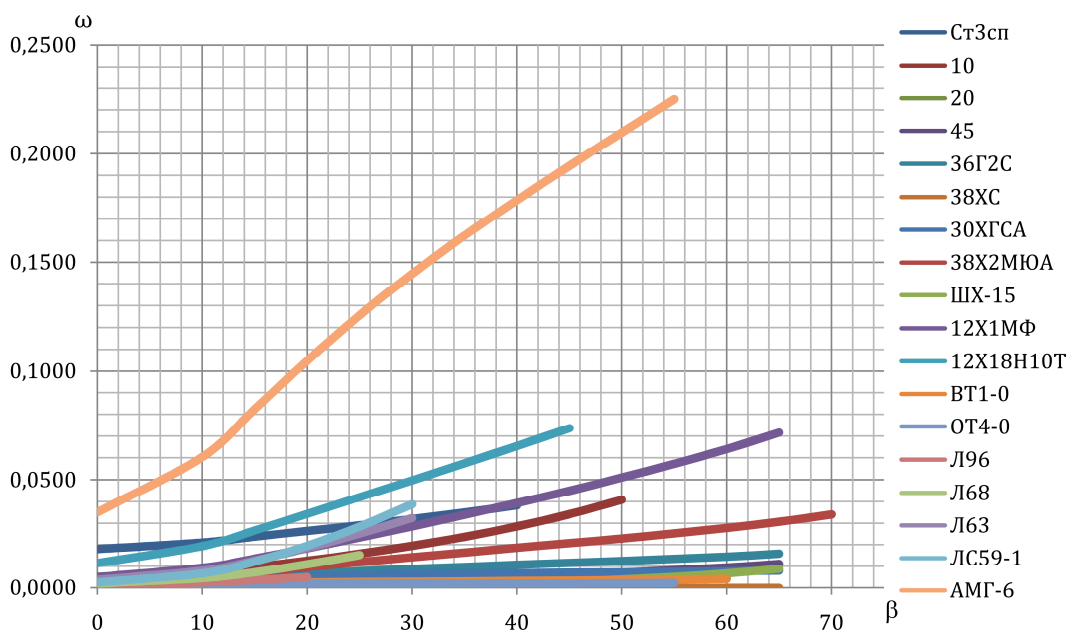


Рис. 5. Зависимость поврежденности металла ω от угла поворота каналов β

Компьютерное моделирование процесса РКУП металла

В ходе исследования результатов эксперимента были получены данные о деформированном состоянии металла. В качестве исследуемых параметров, характеризующих деформированное состояние металла в очаге деформации (точки 1–8), были выбраны скорость деформации ξ_n (рис. 7) и степень деформации ε_n (рис. 6) при различных условиях трения.

Характер зависимости степени деформации ε_n от времени таков, что в очаге деформации ($\tau = 0,5\text{--}1$ с) наблюдается резкий рост степени деформации ε_n до 1 при малых показателях трения ($\psi < 0,05$) и 1,5 при повышенных. В дальнейшем степень деформации ε_n центральной части метал-

ла (точки 3–6) практически не изменяется, рост степени деформации ε_n наблюдается в приконтактных зонах (точки 1, 2, 7, 8) ввиду влияния трения. Процесс накопления степени деформации ε_n при РКУП идет тем быстрее, чем меньше показатель трения ψ . Количественно степень деформации ε_n при различных условиях трения лежит в пределах от 2 до 3.

Анализ скорости деформации ξ_n процесса РКУП при различных показателях трения ψ показывает, что с увеличением показателя трения ψ процесс деформирования длится дольше, сохраняя при этом соответствующие значения скорости деформации. При $\psi = 0$ деформация проходит практически мгновенно (ярко выраженные экстремумы на рис. 7, а).

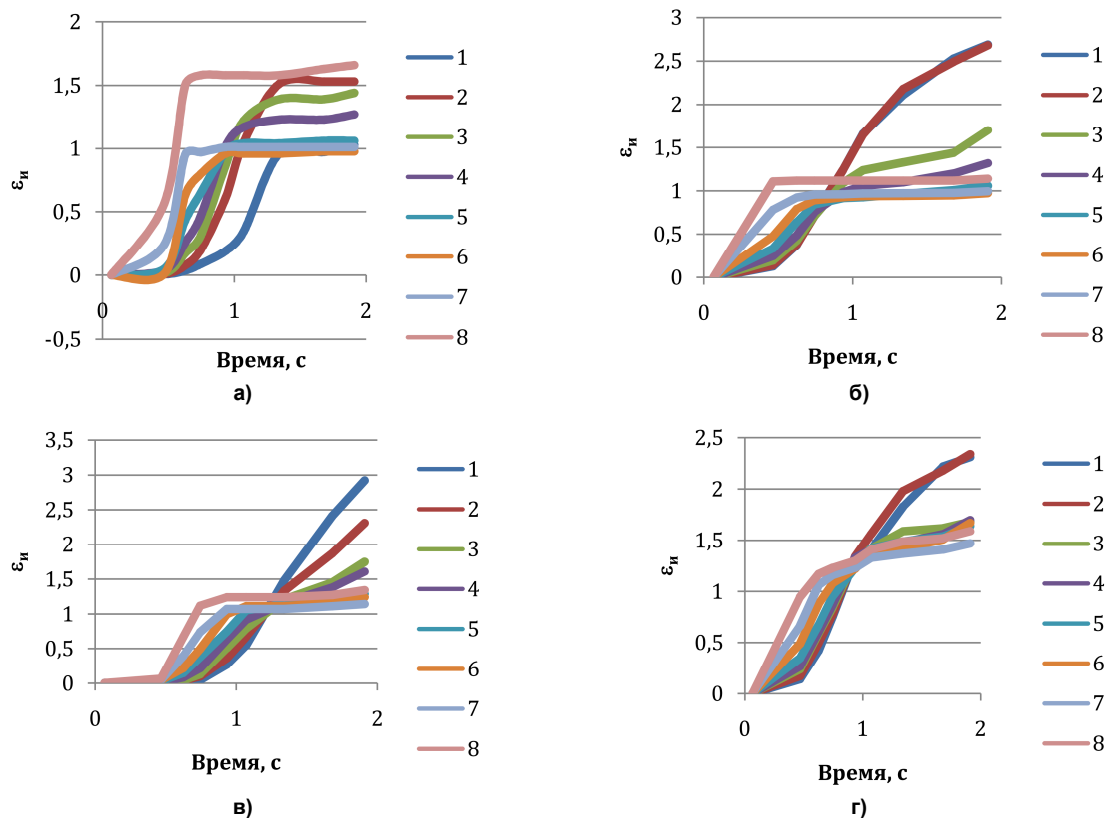


Рис. 6. Изменение $\varepsilon_{ш}$ вдоль траектории течения частиц металла в очаге деформации:
а – без трения; б – $\psi = 0,05$; в – $\psi = 0,15$; г – $\psi = 0,3$

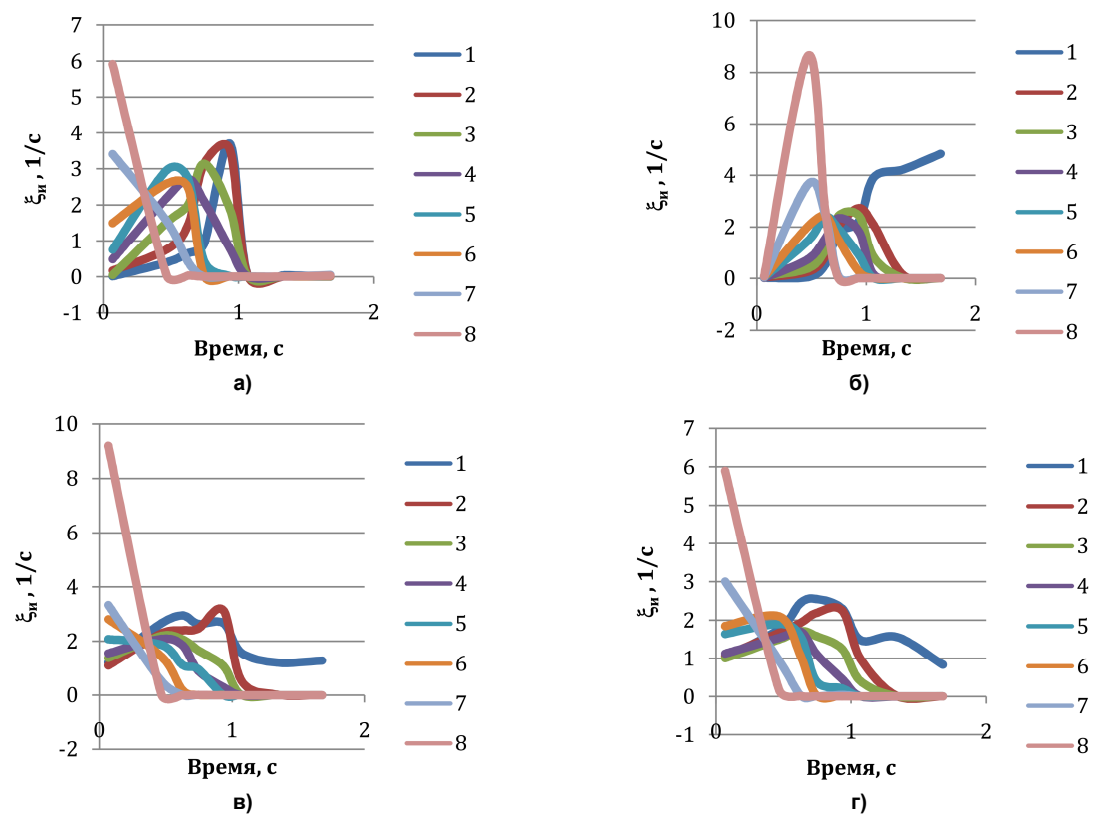


Рис. 7. Изменение $\xi_{ш}$ вдоль траектории течения частиц металла в очаге деформации:
а – без трения; б – $\psi = 0,05$; в – $\psi = 0,15$; г – $\psi = 0,3$

Наибольшие значения скорости деформации ξ_{II} возникают в областях вблизи поворота каналов (точка 8, рис. 8).

Представленные результаты показывают, что с увеличением показателя трения ψ величина за-

стойной области увеличивается. Это не противоречит теоретическому решению, а подтверждает его.

Анализ лагранжевой сетки (рис. 10) и характер изменения скорости деформации (рис. 9) по ширине очага деформации (точки 1–21) подтвер-

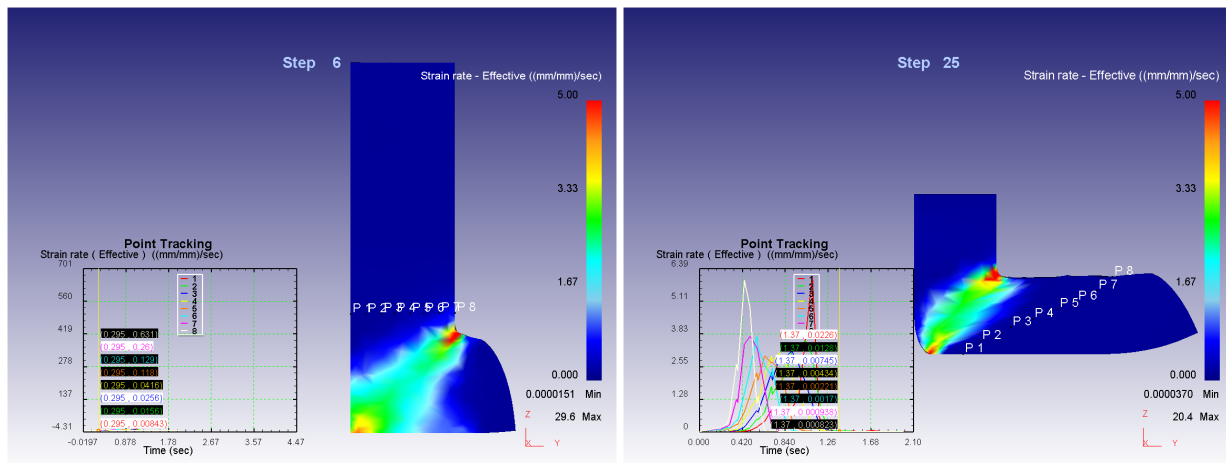


Рис. 8. Изменение скорости деформации ξ_{II} вдоль траектории течения частиц металла в очаге деформации при $\psi = 0$

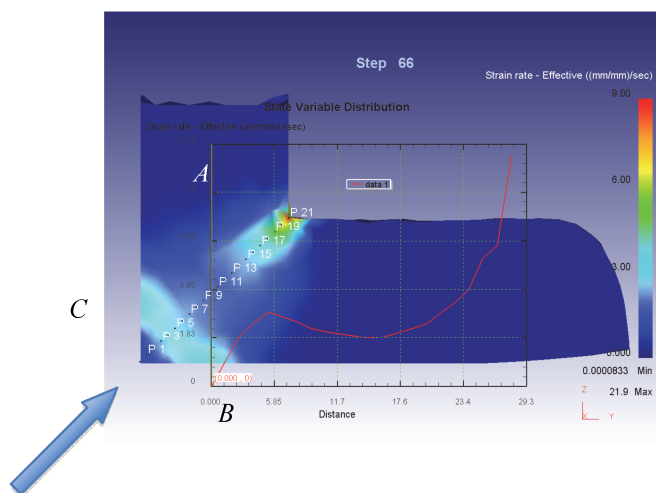


Рис. 9. Изменение ξ_{II} металла по ширине очага деформации при $\psi = 0,3$: ABC – зона пластического течения

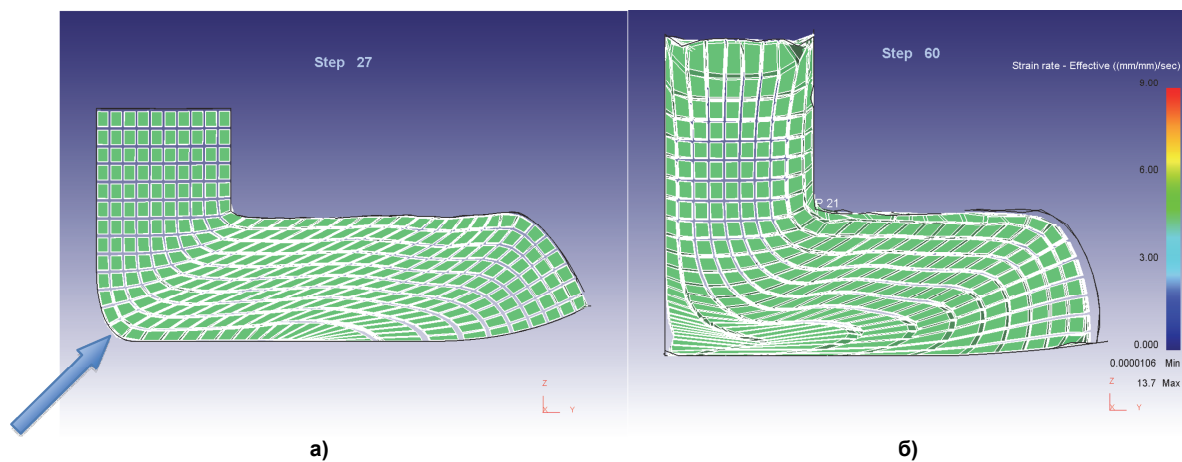


Рис. 10. Лагранжева сетка при РКУП: а – $\psi = 0$; б – $\psi = 0,3$

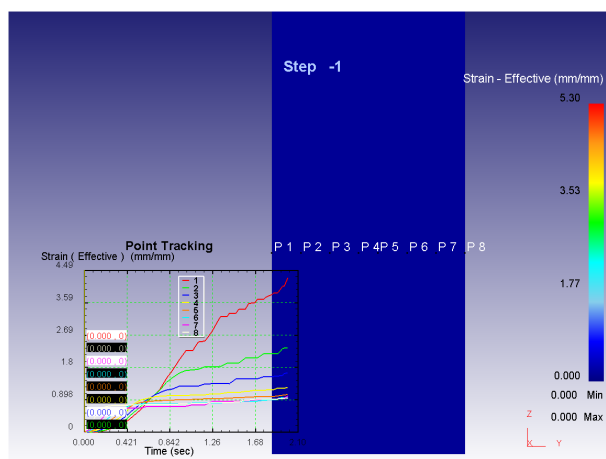


Рис. 11. Выбор точек, для которых производился расчет степени деформации сдвига

ждают наличие застойной зоны на повороте каналов, где металл практически не деформируется ($\xi_{ni} \rightarrow 0$), а вся деформация сосредоточена в пределах «веера» ABC .

Анализ неоднородности деформации при РКУП

Результаты расчетов размеров очага деформации, степени деформации для восьми частиц, имеющих различную координату по сечению заготовки сравним с аналогичными характеристиками, полученными по теоретическим формулам. Степень деформации подсчитали по формуле

$$\varepsilon_{ni} = \frac{\Lambda}{\sqrt{3}},$$

где $\Lambda = \alpha + 4\text{ctg}\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)$, $\alpha = |\arccos(\psi) - 2\beta|$, ψ – показатель трения по Зибелю, β – угол поворота каналов при РКУП.

В застойной области под воздействием на-

пряжений трения градиент скорости частиц меньше, чем для центральной области очага деформации. Для оценки неравномерности деформации по сечению заготовки выполнен расчет накопленной степени деформации сдвига частицами по восьми траекториям для различных условий трения (рис. 11).

Среднее значение степени деформации по высоте

$$\varepsilon_{иср} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ni},$$

где i – номер траектории частицы, $n = 8$. Неравномерность деформации по высоте очага деформации можно оценить с помощью коэффициента вариации

$$V = \frac{S \cdot 100\%}{\varepsilon_{иср}},$$

где $S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ni} - \varepsilon_{иср})^2 \right]^{1/2}$ – среднеквадратичное отклонение. Результаты расчетов представлены в таблице, а также на рис. 12, 13.

Результаты компьютерного моделирования

№ траектории	Степень деформации сдвига (ε_{ni})			
	При $\psi = 0$	При $\psi = 0,05$	При $\psi = 0,15$	При $\psi = 0,3$
1	4,157	4,396	4,659	5,006
2	2,615	2,944	3,274	3,377
3	1,940	2,061	2,234	2,286
4	1,573	1,621	1,639	1,743
5	1,483	1,385	1,458	1,662
6	1,346	1,171	1,263	1,533
7	1,247	1,091	1,174	1,238
8	1,305	1,271	1,036	1,204
Статистические характеристики результатов				
$\varepsilon_{иср}$	1,958	1,993	2,092	2,256
S	0,996	1,147	1,268	1,315
$V = S \cdot 100\% / \varepsilon_{иср}$	50,9	57,6	60,6	58,3
$\varepsilon_{и теор}$	2	2,226	2,072	1,87

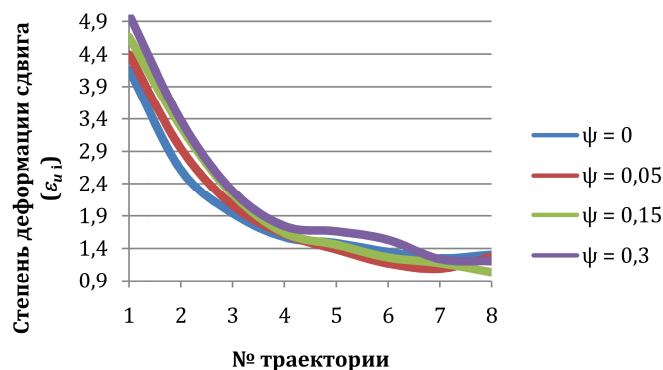
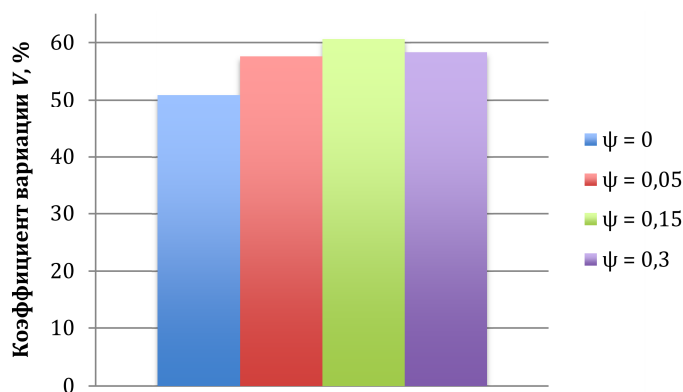


Рис. 12. Распределение степени деформации по траекториям

Рис. 13. Коэффициент вариации V для различных условий трения

По графикам (см. рис. 12, 13) видно, что степень деформации ϵ_{ni} в 4–5 раз больше в застойной области по сравнению с остальной частью очага деформации. Кроме того, с увеличением показателя трения ψ значения степени деформации ϵ_{ni} увеличиваются соответственно. Такой характер распределения неоднородности деформации подтверждается теорией. Коэффициент вариации V для различных условий трения лежит в пределах от 50–60 %, что свидетельствует о значительной неоднородности деформации по длине очага деформации. Формирование «веера» деформации при увеличении показателя трения ψ от 0 до 0,3 подтверждает теоретические расчеты.

Заключение

В работе приведено теоретическое исследование механики деформированного состояния и разрушения металла при РКУП методами линий скольжения и верхней оценки, а также математическое моделирование в программном комплексе Deform-3D. Вычислительный эксперимент с достаточной точностью подтверждает теоретические исследования РКУП. Условие минимизации застойной области (то есть снижение угла $\alpha \rightarrow 0$) является важной особенностью реализации оптимальных режимов деформирования при РКУП для различных условий трения, при котором достига-

ется максимальное упрочнение металла без разрушения. Задача обеспечения максимального упрочнения, а, следовательно, и измельчения зерна, в условиях равновесности процесса РКУП сводится к выбору необходимой температуры предварительного нагрева заготовки и увеличения скорости деформации $\xi_n \rightarrow \infty$, которое достигается в случае, когда $\alpha \rightarrow 0$, то есть размер пластической области должен быть минимальным.

Литература

1. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.И. Копылов // *Металлы*. – 1981. – № 1. – С. 115–123.
2. Логинов, Ю.Н. Оценка неравномерности деформаций и давлений при угловом прессовании / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2001. – № 3. – С. 29–34.
3. Valiev, R.Z. Principles of Equal Channel Angular Pressing As a Processing Tool for Grain Refinement / R.Z. Valiev, T.G. Langdon // *Progress in Materials Science*. – 2006. – Vol. 51, iss. 7. – P. 881–981.
4. Рааб, Г.И. Равноканальное угловое прессование длинномерных заготовок / Г.И. Рааб, Р.З. Валиев // *Цветная металлургия*. – 2000. – № 5. – С. 50–53.

5. Nagasekhar, A.V. *Analysis of T-Shaped Equal Channel Angular Pressing Using the Finite Element Method* / A.V. Nagasekhar, H.S. Kim // *Metals and Materials International*. – 2008. – Vol. 14, no. 5. – P. 565–568.
6. Son, I.H. *Finite Element Investigations of Friction Condition in Equal Channel Angular Extrusion* / I.H. Son, Y.G. Jin, Y.T. Im // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2006. – Vol. 17, no. 1–2. – P. 285–288.
7. Ruzs, S. *Increasing SPD Effectiveness by Changing Deformation Process in the First Pass Through the ECAP Die* / S. Ruzs, K. Malanik, M. Klos // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2007. – Vol. 23, no. 2. – P. 79–82.
8. Maciejewski, J. *Finite Element Analysis of Strain Non-Uniformity in Two Processes of Severe Plastic Deformation* / J. Maciejewski, H. Kopeć, H. Petryk // *Engineering Transactions*. – 2007. – Vol. 55, no. 3. – P. 197–216.
9. Kim, H.S. *Prediction of Temperature Rise in Equal Channel Angular Pressing* / H.S. Kim // *Material Transactions*. – 2001. – Vol. 42, no. 3. – P. 536–538.
10. *Process Modelling of Equal Channel Angular Pressing for Ultrafine Grained Material* / H.S. Kim, P. Quang, M.H. Seo et al. // *Materials Transactions*. – 2004. – Vol. 45, no. 7. – P. 2172–2176.
11. *Процессы пластического и структурообразования металлов* / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
12. Богатов, А.А. *Механические свойства и методы разрушения металлов: учеб. пособие для вузов* / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
13. Вайнблат, Ю.М. *Диаграммы структурных состояний и карты структур алюминиевых сплавов* / Ю.М. Вайнблат // *Металлы*. – 1982. – № 2. – С. 82–88.
14. Вайнблат, Ю.М. *Диаграммы структурных состояний и рекристаллизации горячедеформированного сплава АК4-1* / Ю.М. Вайнблат, С.Ю. Клепачевская, П.Ш. Ланцман // *Физика металлов и металловедение*. – 1977. – Т. 44, вып. 4. – 834 с.
15. Колмогоров, В.Л. *Напряжения, деформации, разрушение* / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
16. Богатов, А.А. *Механика деформирования и разрушения металла при равноканальном угловом прессовании в условиях плоской деформации* / А.А. Богатов, И.В. Лещев // *Технология производства металлов и вторичных материалов*. – Телуртау, 2011.
17. Богатов, А.А. *Ресурс пластичности при обработке металлов давлением* / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 102 с.

Лещев Иван Владимирович, ассистент кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; ivanleshchev@mail.ru.

Богатов Александр Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; omd@urfu.ru.

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

DOI: 10.14529/met150413

THEORETICAL BASIS OF THE STUDY OF THE WORKPIECE DEFORMATION PROCESS WITHOUT CHANGING SHAPE AND SIZE

I.V. Leshchev, ivanleshchev@mail.ru,

A.A. Bogatov, omd@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

An important task of modern metal production is the development and introduction of new technological processes of pressure working, combining a slight change in shape and dimensions of the workpiece with intensive deformation. These requirements are met by the process of equal channel angular pressing (ECAP). The analysis was made of the impact of technological regimes of equal channel angular pressing on the shape of the deformation zone, strain rate intensity, the degree of accumulated deformation, indicators of stress and damage in metal with ideal plastic properties and power-law hardening. Mechanics of equal channel angular pressing is examined by the use of methods of slip lines and the upper estimate, and damage calculation is based on the ductile fracture mechanics in plastic metal working. Regularities of the ECAP process management and rational modes of deformation are found. The facts obtained were confirmed by the results achieved in the ECAP simu-

lation process in the software package Deform-3D. The work shows new areas of the research of equal channel angular pressing, related to grain refinement and the study of the process of metal destruction. In particular, adjusting the strain rate of the process and controlling the temperature, it is possible to provide conditions under which the workpiece material is fully polygonized, new centers of recrystallization are formed, recrystallization processes of the unprepared metal structure (primary recrystallization) are suppressed and conditions for grain refinement and obtaining the ultrafine metal structure are generated. The computer experiment carried out with the help of the software package Deform-3D confirms with sufficient accuracy the theoretical study of the ECAP.

Keywords: equal channel angular pressing; slip lines; damage; fracture; rational deformation regimes; Deform-3D; recrystallization; polygonization; ultrafine microstructure.

References

1. Segal V.M., Reznikov V.I., Dobryshevskiy A.E., Kopylov V.I. Plastic Metal Forming by Simple Strain. *Russian metallurgy (Metally)*, 1981, no. 1. pp. 99–105.
2. Loginov Yu.N., Burkin S.P. [Evaluation of the Strain and Pressure Unevenness at Angular Pressing]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2001, no. 3, pp. 29–34. (in Russ.)
3. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of Equal Channel Angular Pressing As a Processing Tool for Grain Refinement. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, no. 7. pp. 881–981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
4. Raab G.I., Valiev R.Z. [Channel Angular Pressing of Long Workpieces]. *Tsvetnaya metallurgiya*, 2000, no. 3, pp. 50–53. (in Russ.)
5. Nagasekar A.V., Kim H.S. Analysis of T-Shaped Equal Channel Angular Pressing Using the Finite Element Method. *Metals and materials international*, 2008, vol. 14, no. 5, pp. 565–568. DOI: 10.3365/met.mat.2008.10.565
6. Son I.H., Jin Y.G., Im Y.T. Finite Element Investigations of Friction Condition in Equal Channel Angular Extrusion. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, vol. 17, no. 1–2, pp. 285–288.
7. Rusz S., Malanik K., Klos M. Increasing SPD Effectiveness by Changing Deformation Process in the First Pass Through the ECAP Die. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, vol. 23, no. 2, pp. 79–82.
8. Maciejewski J., Kopeć H., Petryk H. Finite Element Analysis of Strain Non-Uniformity in Two Processes of Severe Plastic Deformation. *Engineering Transactions*, 2007, vol. 55, no. 3, pp. 197–216.
9. Kim H.S. Prediction of Temperature Rise in Equal Channel Angular Pressing. *Material Transactions*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 536–538. DOI: 10.2320/matertrans.42.536
10. Kim H.S., Quang P., Seo M.H., Hong S.I., Baik K.H., Lee H.R., Nghiep D.M. Process Modelling of Equal Channel Angular Pressing for Ultrafine Grained Material. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45, no. 7, pp. 2172–2176. DOI: 10.2320/matertrans.45.2172
11. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. et al. *Protsessy plasticheskogo i strukturoobrazovaniya metallov* [Processes and Structure of Metal Plastic]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1977. 232 p.
12. Bogatov A.A. *Mekhanicheskie svoystva i metody razrusheniya metallov* [Mechanical Properties and Methods of Metals Destruction]. Ekaterinburg, USTU–UPI Publ., 2002. 329 p.
13. Vaynblat Yu.M. [Diagrams of Structural States and Structure Maps of Aluminium Alloys]. *Metally*, 1982, no. 2. pp. 82–88. (in Russ.)
14. Vaynblat Yu.M., Klepachevskaya S.Yu., Lantsman P.Sh. [Diagrams of Structural States and Recrystallization of Hot-Formed AK4-1 Alloy]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1977, vol. 44, no. 4, pp. 834–842. (in Russ.)
15. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsii, razrushenie* [Stresses, Strains, Fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.
16. Bogatov A.A., Leshchev I.V. [Mechanics of Metal Deformation and Fracture in Equal Channel Angular Pressing Under Plane Strain Conditions]. *Tekhnologiya proizvodstva metallov i vtorichnykh materialov* [Technology of Production of Metals and Recycled Materials]. Temirtau, 2011. (in Russ.)
17. Bogatov A.A., Mizhiritskiy O.I., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti pri obrabotke metallov davleniem* [Resource of Plasticity in the Metal Deformation Processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 102 p.

Received 6 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лещев, И.В. Теоретические основы исследования процессов деформации заготовки без изменения формы и размеров / И.В. Лещев, А.А. Богатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 98–107. DOI: 10.14529/met150413

FOR CITATION

Leshchev I.V., Bogatov A.A. Theoretical Basis of the Study of the Workpiece Deformation Process Without Changing Shape and Size. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 98–107. (in Russ.) DOI: 10.14529/met150413