

УДК 621.77.01

Я.Ю. Бейгельзімер¹, Р.Ю. Кулагін², О.А. Давиденко¹¹Донецький фізико-технічний інститут ім.О.О.Галкіна НАН України²Institute of Nanotechnology, Karlsruhe Institute of Technology**КРУЧЕННЯ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ: НЕСТІЙКІСТЬ ПЛАСТИЧНОГО ПЛІНУ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

Досліджено стійкість стаціонарного пластичного плинну при крученні дисків під тиском. Показано, що при відсутності швидкісного зміцнення стаціонарний плин стійкий лише у разі ступеневого закону деформаційного зміцнення. Швидкісне зміцнення стабілізує пластичний плин. При нестабільному плинні в зразку виникають вихрові потоки, що призводять до перемішування деформованого матеріалу.

Ключові слова: кручення під високим тиском, простий зсув, стійкість пластичного плинну, моделювання

Я.Е. Бейгельзімер, Р.Ю. Кулагин, А.А. Давиденко**КРУЧЕНИЕ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ: НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Исследована устойчивость стационарного пластического течения при кручении дисков под давлением. Показано, что при отсутствии скоростного упрочнения стационарное течение устойчиво лишь в случае степенного закона деформационного упрочнения. Скоростное упрочнение стабилизирует пластическое течение. При нестабильном течении в образце возникают вихревые потоки, приводящие к перемешиванию деформированного материала.

Ключевые слова: кручение под высоким давлением, простой сдвиг, устойчивость пластического течения, моделирование

Y. Beygelzimer, R. Kulagin, O. Davydenko**THE HIGH PRESSURE TORSION: A PLASTIC FLOW INSTABILITY UNDER EXTREME CONDITIONS**

A steady plastic flow in the high pressure torsion is investigated. It is shown that in the absence of strain rate hardening steady flow is stable only in the case of power-law strain hardening. Strain rate hardening stabilizes the flow. The vortex flow arises when the flow is unstable.

Key words: the high pressure torsion, simple shear, a steady plastic flow, modeling

Постановка проблеми. Кручення під високим тиском (КВТ) – найбільш поширений процес інтенсивної пластичної деформації, який застосовується для отримання наноструктурних металів і сплавів, консолідації порошків (в тому числі і нанорозмірних), холодного сплавлення різних матеріалів та ін. [1]. Як правило використовують просту модель процесу, засновану на припущенні про те, що деформація під час КВТ відбувається за схемою простого зсуву, деформація γ якого обчислюється за формулою:

$$\gamma = \frac{r\beta}{t} \quad (1)$$

де β – кут обертання ковадл, r – відстань точки до вісі обертання ковадл, t – товщина зразка.

Оскільки величина деформації зсуву має принципове значення для розшифровки результатів експериментів, її просторовий розподіл при КВТ було вивчено в цілому ряді робіт. Дослідження [2-5] показали, що в залежності від параметрів геометрії КВТ, а також умов контактного тертя на поверхні ковадл, спостерігаються істотні відхилення від зазначених вище припущень. Перш за все це виражається у можливій неоднорідності деформації по висоті зразка і наявності "мертвої зони" в кутах ковадл. Дослідження, виконані в роботах [4, 5] дозволили встановити умови, при виконанні яких допущення простої моделі КВТ виконуються практично в усьому об'ємі зразка.

У зазначених у попередньому абзаці роботах основна увага приділялася впливу геометричних параметрів КВТ і умов контактного тертя на просторовий розподіл деформації в об'ємі зразка. В роботі [6] досліджено вплив кривої деформаційного зміцнення матеріалу на залежність поля швидкості деформації від кута обертання ковадла. Показано, що при ступеневому характері деформаційного зміцнення і відсутності швидкісного зміцнення, поле швидкості деформації в об'ємі зразка не залежить від кута обертання ковадл. В цьому випадку величина деформації зсуву в будь-якій точці зразка прямопропорційна куту обертання ковадл. Порушення ступеневого закону деформаційного зміцнення тягне за собою нестаціонарність поля швидкості

деформації. Остання обставина призводить до того, що деформація зсуву перестає бути прямопропорційною куту обертання ковадл. В роботі [6] показано також, що насичення в деформаційному зміцненні, при відсутності швидкісного зміцнення, призводить до зосередження деформації в тонкому шарі зразка. Цей ефект не пов'язаний з геометрією ковадл і тертям, але обумовлений нестійкістю матеріалу при пластичному зсуві [7, 8].

Мета статті: шляхом розрахунку в пакеті DEFORM 3D, показати, що швидкісне зміцнення матеріалу стабілізує пластичний плин при КВТ, а також, показати, що подальша деформація в тонкому шарі призводить до перемішування матеріалу, що відповідає гіпотезі роботи [9] про дві стадії простого зсуву.

Виклад основного матеріалу. В роботі [10] було показано, що деформаційне зміцнення за ступеневим законом, пов'язано з розвитком самоподібної мікроструктури матеріалів при пластичній деформації і відповідає даним експериментальних спостережень в певному діапазоні деформацій Мізеса. Коли деформація перевищує цей діапазон, то як мікроструктура так деформаційне зміцнення матеріалу досягає рівня насичення, і ступеневий закон вже не діє. Насиченість зміцнення при КВТ повинно призвести до локалізації деформацій в тонкому шарі зразка в разі, коли швидкісне деформаційне зміцнення відсутнє [6]. Ми покажемо шляхом чисельного МКЕ-моделювання, що швидкісне зміцнення може в цьому випадку стабілізувати пластичний плин при КВТ і запобігти локалізації деформації.

Всі розрахунки було виконано в програмі DEFORM-2D/3D з використанням моделі 2D осесиметричного кручення [11].

Схема процесу КВТ показана на рис. 1.

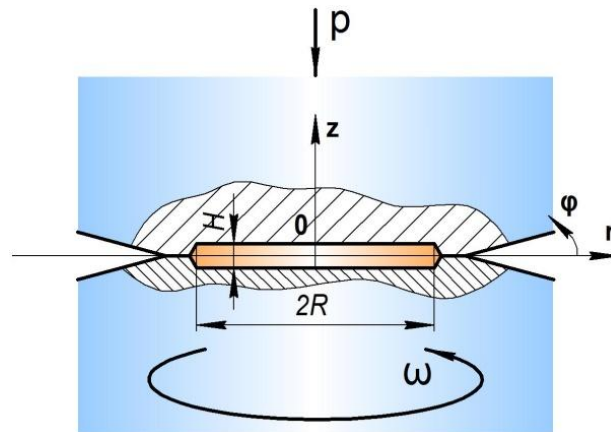


Рис. 1. - Геометрична схема процесу КВТ

Дві криві напруження–деформація були взяті з [6]. Криві були змінені з урахуванням швидкісного зміцнення:

$$\sigma_s [\text{MPa}] = [1050 - 463 \exp(-0.39 e_M)] \left(\frac{\dot{e}_M}{a} \right)^b, \quad (2)$$

$$\sigma_s [\text{MPa}] = 740 e_M^{0.18} \left(\frac{\dot{e}_M}{a} \right)^b, \quad (3)$$

де a, b – параметри швидкісного зміцнення.

Перший доданок у правій частині рівняння (2) являє собою апроксимацію експериментальної кривої напруження-деформація порошку Fe, отриманої в [12] за умови КВТ. Перший доданок рівняння (3) – ступеневий закон, який наближає цю криву до значень напруження $1 < e_M < 5$.

Щоб проілюструвати ефект швидкісного зміцнення на пластичний плин при КВТ, ми провели п'ять чисельних експериментів. Умови експериментів наведені в таблиці 1. У всіх експериментах: $a = 0.05 \text{ s}^{-1}$, діаметр зразка – 10 мм, його товщина – 1 мм.

Параметри кривої напруження-деформація для МКЕ-моделювання					
Експеримент	1	2	3	4	5
Крива напруження-деформація	Рівн. (3)	Рівн. (2)	Рівн. (2)	Рівн. (2)	Рівн. (2)
Параметр b	-	0	0,005	0,05	0,5

Результати чисельного моделювання показані на рис. 2.

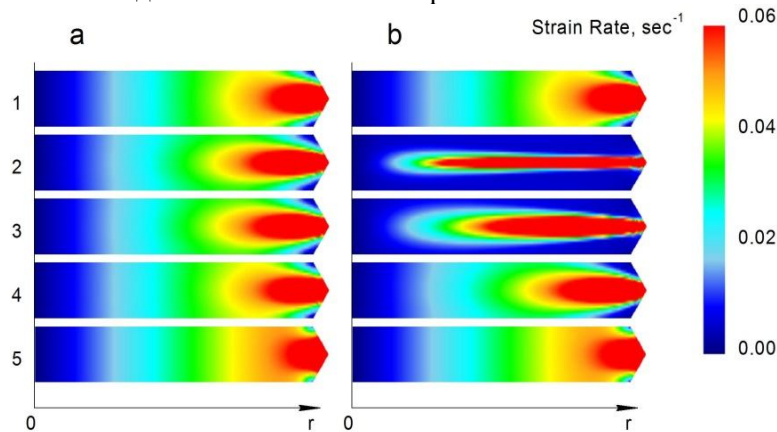


Рис. 2 - Карти швидкості деформації за Мізесом у (r, z) площині (МКЕ-моделювання) при куті обертання ковадл $\beta = 0.5\pi$ (a) and $\beta = 3.5\pi$ (b); нумерація на малюнку відповідає таблиці 1

Як видно на рис. 2а для малих кутів обертання β тобто до досягнення зміцненням рівня насичення і коли ступеневий закон дійсний, зразок деформується практично у відповідності з (1). Для великих значень β і малих значеннях чутливості швидкості деформації b , деформація локалізується навколо площини геометричного зсуву (рис. 2b, випадки 2, 3). Але коли чутливість швидкості деформації матеріалу досить велика (наприклад, при надпластичному плинні, тобто > 0.3 рис. 2b випадок 5), зразок деформується у відповідності до (1). Проміжний випадок, коли $b = 0.05$ (рис. 2b, випадок 4) є досить цікавим, оскільки локалізація деформації не дуже виражена, а деформація зсуву розподіляється майже за (1).

Ультрадрібнозернисті матеріали, оброблені КВТ зазвичай мають коефіцієнт чутливості швидкості деформації в діапазоні $0.01 \div 0.1$ [13, 14], який показує, що рівняння (1) ще може бути застосованим в якості грубої оцінки для деформації зсуву при КВТ. При цьому слід мати на увазі можливість скорочення по висоті зони інтенсивної деформації, обумовлену вичерпанням деформаційного зміцнення, при недостатньому зміцненні швидкісному. Те, що така можливість цілком реальна буде експериментально показано далі. Крім того, описані вище результати свідчать про те, що починаючи з певної величини деформації зсуву ламінарний плин матеріалу при КВТ може змінюватися турбулентним, що відповідає гіпотезі роботи [9].

Нижче наведені результати експериментів з КВТ на композитних мідних зразках, що містять вставки з алюмінію та латунні маркери.

Зразки готували наступним чином.

В мідному циліндрі довжиною 35 мм і діаметром 20 мм було просвердлено вісім каналів діаметром 2 мм. Канали були просвердлені на відстані 4,0 та 7,0 мм від осі заготовки. Алюмінієвий дріт був вставлений в чотири канали, які були ближче до осі циліндра. Латунний дріт було введено в периферійні канали. Заготовки піддавали екструзії до діаметру 12 мм, щоб щільно зафіксувати («запечатати») дроти в мідній матриці. З отриманих заготовок вирізалися дископодібні зразки товщиною 1,0 мм. Ці диски використовували для експериментів з КВТ. Деформацію здійснювали при рівні тиску 4,5 ГПа і кутовій швидкості ковадла в 1 обертання за хвилину. На рис.3 показані профілі зразків перпендикулярні до осі обертання, після обертання на кути $\pi/2$ (рис. 3а) та π (рис. 3b). Видно, що при $\beta = \pi/2$ (рис. 3 а, b) позиції маркерів добре узгоджуються з розрахованими з моделі простої деформації зсувом. Це вказує на справедливості цієї моделі, принаймні для цього значення кута обертання. Картина змінюється повністю коли

$\beta = \pi$. Мітки розмиті на глибинах від 300 до 500 мкм (рис. 3 с, d). Це дозволяє зробити висновок, що основна деформація локалізується в цьому 300 мкм товстому шарі.

Поперечний переріз КВТ-деформованого диска після трьох обертів ковадла представлений на рис. 4. Як видно з малюнка, КВТ призводить до змішування матеріалу матриці з маркерами.

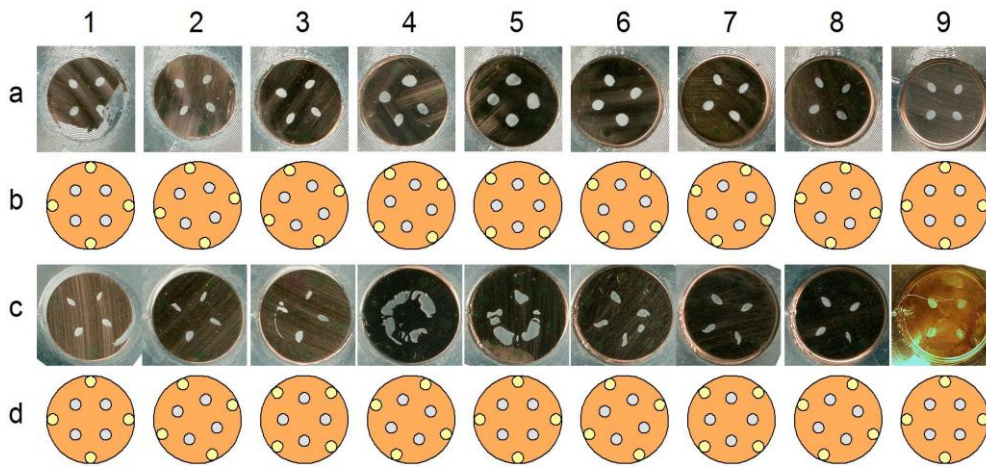


Рис. 3.- Обертання на 90° (a і b); обертання на 180° (c і d). Цифри на малюнку відповідають глибині шагу (кожен шаг – 100 мкм)



Рис. 4. - Поперечний переріз мідного диска з маркерами після 3 обертів КВТ

Таке змішування можливо тільки при наявності турбулентних вихрових потоків у зразку під час КВТ. Цей висновок узгоджується з припущеннями авторів [9], що турбулентний плин відбувається в матеріалі при великих деформаціях простого зсуву. Ми вважаємо, що це є турбулентний пластичний плин, який пояснює ефективність КВТ для холодного з'єднання різних матеріалів [15]. Формування сплавів пов'язується з масопереносом за механізмом дифузії. Дифузія може проходити досить швидко при підвищеній температурі, але швидкість дифузійного масопереносу при низькій температурі недостатньо висока. Швидкість масопереносу, необхідну для холодного з'єднання можна забезпечити тільки за рахунок стохастичного руху вихору, який подібний до турбулентного потоку в рідинах або газах. Також, можна показати, що переробка методом КВТ порошкової суміші певного складу веде до формування високоентропійних сплавів при температурі навколишнього середовища. Ми вважаємо, що турбулентний плин матеріалу при КВТ відіграє найважливішу роль в цьому процесі.

В [20] формування вихорів в пластично деформованому матеріалі при простому зсуві пов'язаний з місцевим блокуванням деформації зсуву. За допомогою чисельного моделювання покажемо, що місцеві блокування деформації зсуву в зразку під час КВТ призводить до вигинів і поворотів перешкод. Ми розглядаємо це як фізичну причину турбулентного плину при КВТ. На рис. 5 показана схема та результати розрахунків.

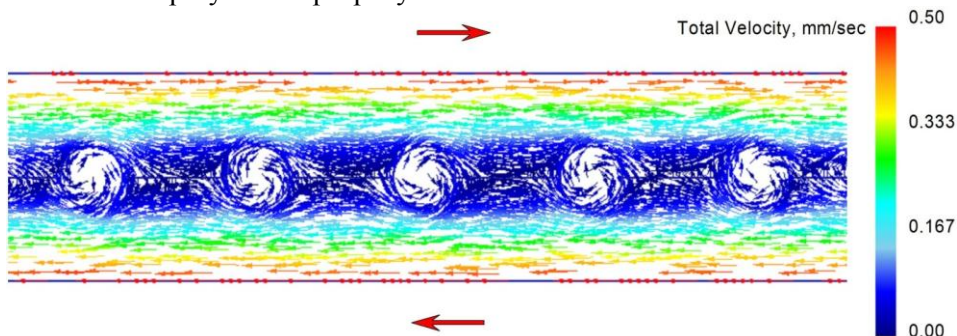


Рис. 5. - Простий зсув, що локально блокується перешкодами (МКЕ моделювання)

Шар пластичного матеріалу розташований між двох пластин, які рухаються в протилежних напрямках. В шарі є перешкоди, що локально блокують зсув. Перешкода змодельована з матеріалу з межею плинну в десять разів вище, ніж у шарах, та має форму циліндра (перпендикулярно до площини малюнка).

Рис. 5 показує, що локальне блокування зсуву дійсно викликає обертання перешкод, що призводить до утворення вихорів при досить великій деформації зсувом. В якості перешкод при КВТ-деформації можуть розглядатися різного виду неоднорідності в матеріалі.

Висновки. Отримані результати свідчать про те, що механічні властивості і структура оброблюваних матеріалів можуть мати істотний вплив на поле швидкостей і деформований стан у зразку в процесі КВТ. При насиченні напружень в матеріалі з низькою або нульовою швидкістю зміцнення, деформація локалізується в тонкому шарі зразка. Товщина цього шару зростає зі збільшенням показника ступеня b швидкості зміцнення. При $b > 0,1$ локалізація деформації не відбувається. Виникнення неоднорідності деформації, що блокує простий зсув призводить до турбулентного плинну при КВТ. Це прискорює масоперенос, необхідний для формування сплавів. В роботі зазначено, що за допомогою цього підходу можуть бути отримані високоентропійні сплави.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф71.

Список використаних джерел:

1. Zhilyaev, A. P., Langdon T.G., 2008. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science* 53 (6), 893–979.
2. Roberto B. Figueiredo • Gustavo C. V. de Faria • Paulo R. Cetlin • Terence G. Langdon, Three-dimensional analysis of plastic flow during high-pressure torsion. *J Mater Sci* (2013) 48:4524–4532
3. Seung Chae Yoon, Zenji Horita, Hyoung Seop Kim Finite element analysis of plastic deformation behavior during high pressure torsion processing. *Journal of materials processing technology* 201 (2008) 32–36
4. Reinhard Pippan, Stephan Scheriau, Anton Hohenwarther, Martin Hafok. Advantages and limitations of HPT: a review. *Materials Science Forum* Vols. 584-586 (2008) pp 16-21
5. Dong Jun Lee, Hyoung Seop Kim. Finite element analysis for the geometry effect on strain inhomogeneity during high-pressure torsion. *J Mater Sci* (2014) 49:6620–6628
6. Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Laszlo S. Toth and Yulia Ivanisenko. The self-similarity theory of high pressure torsion. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2016, 7, 1267–1277.
7. R.Hill. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *Journal of the mechanics and physics of solids* Volume: 6 Issue: 3 Pages: 236-249 Published: 1958
8. Ja. E. Beigelzimer, B. Efros, V. Varyukhin, A. Khokhlov. A continuum model of a structurally-inhomogeneous porous body and its application for the study of stability and viscous fracture of materials deformed under pressure. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 48, No. 5, pp. 629–640 (1994).
9. Y. Beygelzimer, Ruslan Z. Valiev, V.Varyukhin Simple Shear: Double-Stage Deformation // *Materials Science Forum* Vols. 667-669 (2011) pp 97-102
10. Y. Beygelzimer, L. S. Toth, J. J. Jonas, Some Physical Characteristics of Strain Hardening in Severe Plastic Deformation, *Adv. Eng. Mater*, Volume 17, Issue 12, pages 1783–1791, 2015
11. DEFORM v11.0 Documentation, Scientific Forming Technologies Corporation, <http://www.deform.com/>
12. Zhao, Y. J., Massion, R., Grosdidier, T., Toth, L. S., 2015. Gradient Structure in High Pressure Torsion Compacted Iron Powder. *Advanced Engineering Materials* 17 (12), 1748–1753.
13. N. Chinh, P. Szommer, Z. Horita, T. Langdon *Mater Sci Forum* (2006) 503–504:1001;
14. R. Valiev, M. Murashkin, A. Kilmametov, B. Straumal, N. Chinh, T. Langdon *J Mater Sci* (2010) 45:4718–4724
15. P.W. Bridgman, *Phys. Rev.* 1935, 48, 15.
16. M. Pouryazdan Panah, *Shear-Induced Mixing in Metallic Systems*, PhD Thesis, Darmstadt, Germany, 2015
17. H.-J. Kim, S. Karthikeyan, D. Rigney A simulation study of the mixing, atomic flow and velocity profiles of crystalline materials during sliding. *Wear* 267 (2009) 1130–1136
18. Narayan K. Sundaram, Yang Guo, and Srinivasan Chandrasekar Mesoscale Folding, Instability, and Disruption of Laminar Flow in Metal Surfaces. *PRL* 109, 106001 (2012)
19. L. Prandtl, O.G. Tietjens, *Fundamentals of Hydro - and Aeromechanics*, Dover Pub. Inc., New York, 1957.
20. Y. Beygelzimer, Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation *Materials Science Forum* Vol. 683 (2011) pp 213-224

Рецензент:

Штерн Михайло Борисович, чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2017