

УДК 62-11(04)

Я.Е. Бейгельзимер¹, Н.М. Лавриненко²¹Донецкий физико-технический институт НАН Украины,²Научно-технологический центр "Реактивэлектрон" НАН Украины

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ ПРОСТОГО И ЧИСТОГО СДВИГОВ

Розглянута чисельна модель плоскої деформації пластини з включенням за схемами простого і чистого зсуву. Дослідження виконано за допомогою кінцево-елементного пакету ANSYS. Моделювання показало, що при навантаженні системи за двома модами є як спільні риси, так і відмінність у поведінці включення.

Ключові слова: *ідеальна пластичність, деформація простого зсуву, деформація чистого зсуву.*

Постановка проблемы, анализ исследований и публикаций. В настоящее время можно считать надежно установленным тот факт, что при достаточно больших деформациях металлов по схеме простого сдвига наступает стадия идеальной пластичности, т.е. напряжение сдвига выходит на некоторый фиксированный уровень и в дальнейшем не изменяется с ростом деформации.

Одним из первых, аномально слабое упрочнение при больших деформациях обнаружил П. Бриджмен в своих классических экспериментах по кручению под высоким давлением [1]. В последующем, многочисленные исследования [2, 3] подтвердили, что кривые течения, полученные при кручении, с ростом деформации выходят на насыщение. Наконец, наиболее убедительно идеальная пластичность выявлена в сравнительно недавних исследованиях по кручению под высоким давлением [4-7]. В этих работах не только показано постоянство момента кручения при достаточно больших деформациях сдвига, но также установлено, что и микроструктура материалов при этом остается неизменной.

В связи с явлением идеальной пластичности возникают, как минимум, два вопроса: чем оно обусловлено и проявляется ли оно лишь в схеме простого сдвига или же может наблюдаться при других видах нагружения?

До настоящего времени окончательных ответов на эти вопросы нет. Так, П. Бриджмен, на основе своих экспериментов, полагал, что аномально низкое упрочнение характерно лишь для простого сдвига. Автор работы [8] также считает, что схема нагружения во многом определяет структуру и свойства металлов при больших деформациях. С другой стороны, согласно [4], результаты экспериментов убедительно показывают, что вне зависимости от деформационной моды, эволюция структуры металлов подчиняется, в основном, одним и тем же универсальным закономерностям. Поэтому, несмотря на то, что авторы обнаружили идеальную пластичность лишь при кручении под давлением, они полагают, что это явление должно быть общим для всех схем нагружения. Проблема лишь в сложности достижения больших деформаций по схемам, отличным от кручения под давлением.

Результаты исследования. В статье рассмотрена численная модель плоской деформации пластины с включением с нагружением по схемам простого и чистого сдвигов. Исследование выполнено с помощью конечно-элементного пакета ANSYS. Моделирование показало, что при нагружении системы по двум деформационным модам имеются как общие черты, так и различия в поведении включения. Общим является то, что начиная с величины деформации $\gamma^* \sim 10^{-3}$ происходит проскальзывание на некоторых участках границы раздела. С ростом деформации число участков и величина проскальзывания растут. Отличие в том, что если при удлинении пластины проскальзывание на разных участках границы раздела мало и носит случайный характер, то в случае простого сдвига оно скоординировано и приводит к уменьшению деформации сдвига во включении.

Настоящая статья развивает представления работ [9, 10], в основе которых лежит высказанная первым автором гипотеза о турбулентном движении в металлах при больших деформациях по схеме простого сдвига.

Рассмотрим, схематически, процесс фрагментации металлов при пластической деформации. На начальном этапе деформирования образуются слаботориентированные ячейки, размером в

десятки нанометров. В результате, возникает мелкоячеистая сеть из малоугловых границ. Начиная с определенного момента, в ней образуются участки с высокоугловыми разориентировками, число которых растет с деформацией. Известно, что по высокоугловым границам деформационного происхождения, при определенных условиях, возможно проскальзывание (даже при криогенных температурах). Проскальзывание по ним осуществляется путем движения зернограницных дислокаций. Обоснуем предположение о том, что движущей силой ротаций являются моментные напряжения, возникающие в представительном объеме материала при простом сдвиге.

Классическая механика сплошных сред основывается на допущении о симметричности тензора напряжений. В подавляющем большинстве практически важных случаев, оно хорошо соответствует эксперименту. Значительное различие между теорией и экспериментом возникает тогда, когда существенными являются градиенты напряжений. В частности, это происходит в зернистых средах. Из-за сильно неоднородной структуры, в них имеются резкие перепады напряжений, приводящие к эффектам, не описываемым симметричной теорией. Для исследования таких материалов привлекают моментную механику сплошных сред [10].

С нашей точки зрения, подобные эффекты возникают в металлах при простом сдвиге, вблизи перколяционного перехода. Они связаны с нарушением закона парности касательных напряжений. Причиной такого нарушения могут стать вакансии, появляющиеся в приграничной области при сдвиге. Действительно, рост числа вакансий приводит к увеличению объема материала в приграничной области. Это вызывает возрастание касательных напряжений с ростом давления, из-за дополнительной работы, которую необходимо совершить при сдвиге против сил давления. Схематически представим представительскую ячейку в виде квадрата со стороной L и проанализируем силы, действующие на него (рис. 1).

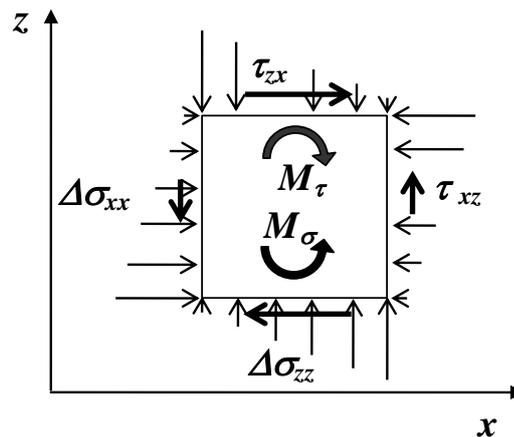


Рис. 1. Модель возникновения силовых моментов при простом сдвиге

Пусть давление в направлении оси z превышает давление в направлении оси x . Согласно сказанному выше, это приведет к неравенству $\tau_{zx} > \tau_{xz}$, т.е. к нарушению закона парности касательных напряжений. Из рис. 1 следует, что на квадратную ячейку действует момент сил $M_\tau = L^2(\tau_{zx} - \tau_{xz})$, обусловленный касательными напряжениями (принято, что толщина ячейки, в направлении перпендикулярном плоскости xz , равна 1). Ее малый поворот под действием этого момента, вызывает ответную упругую реакцию окружающего материала, в виде дополнительного сильно неоднородного поля нормальных напряжений $\Delta\sigma_{xx}$ и $\Delta\sigma_{zz}$, создающего компенсирующий момент M_σ , действующий на ячейку. Пока указанные моменты равны друг другу, ячейка находится в равновесии. При определенном пороговом значении τ_{zx} создаются условия для проявления stick – slip эффекта. Это приводит к нарушению равновесия между M_τ и M_σ , и скачкообразному повороту ячейки под действием разности моментов $M_\sigma - M_\tau$. В результате, происходит релаксация M_σ , и равновесие восстанавливается.

Покажем, что описанный выше механизм релаксации напряжений характерен лишь для моды простого сдвига. Для этого рассмотрим нагружение механической конструкции, которая имеет вид плоской пластины, высотой H и длиной B , содержащей цилиндрическое включение диамет-

ром D . При деформации конструкции, связь между включением и пластиной допускает их относительное проскальзывание, но препятствует образованию зазоров между ними. На границе раздела выполняется условие: $\tau \leq \tau_0 + \mu p$, где τ и p – соответственно, касательное напряжение и давление на границе раздела; τ_0 и μ – напряжение сцепления и коэффициент трения между пластиной и включением. На участках границы, где выполняется знак равенства в соотношении, происходит проскальзывание между включением и пластиной.

Это условие учитывает указанную выше зависимость напряжения сдвига по высокоугловой границе от величины давления на нее.

Материал пластины и включения один и тот же и представляет собой изотропно упругое тело, с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν .

Мы численно исследовали плоскую деформацию системы при простом сдвиге (нагружение 1) и при растяжении вдоль стороны B (нагружение 2). Были приняты следующие значения параметров: $D=1$, $H=10$, $B=100$, $\nu=0.3$, $\tau_0=5 \cdot 10^{-4} E$, $\mu=10^{-3}$. Линейные размеры удовлетворяют условиям $\frac{H}{B} \ll 1$, $\frac{D}{H} \ll 1$, что исключает краевые эффекты. Значения ν и τ_0/E характерны для металлов, величина μ оценена по зависимости напряжения сдвига от давления для металлов [2].

Для выявления закономерностей, связанных с модой деформации, в обоих вариантах нагружения задавали одну и ту же величину максимального сдвига γ . В случае простого сдвига, необходимое смещение верхнего края пластины относительно нижнего Δ определяли по формуле: $\Delta = \gamma H$. Во втором варианте нагружения, необходимую величину удлинения пластины ΔB определяли из соотношения, связывающего максимальное удлинение с максимальным сдвигом [12]. В результате, получили следующее выражение: $\Delta B = \gamma B(1 - \nu)$.

Расчеты выполняли в диапазоне деформаций сдвига $0 \leq \gamma \leq 0.005$ с помощью программного пакета ANSYS. На рис. 2 представлена расчетная конечно-элементная сетка после деформации (типичная картина). При расчетах использовался конечный элемент PLANE183, который имеет 8 узлов и характеризуется двумя степенями свободы в каждом узле: узловыми смещениями вдоль x и y направлений.

Для того чтобы корректно выполнить расчеты, необходимо использовать контактный анализ: конечные элементы CONTA172 были помещены на пограничную поверхность матрицы, а конечные элементы TARGE169 расположены на поверхности включения. Расчеты проводились с помощью метода Лагранжа, который запрещает взаимное проникновение матрицы и включения, и разрешает взаимное проскальзывание соприкасающихся поверхностей. Величина проскальзывания соприкасающихся поверхностей зависит от тангенциальной жесткости. На рис. 3 приведены типичные поля смещений при деформации по двум схемам.

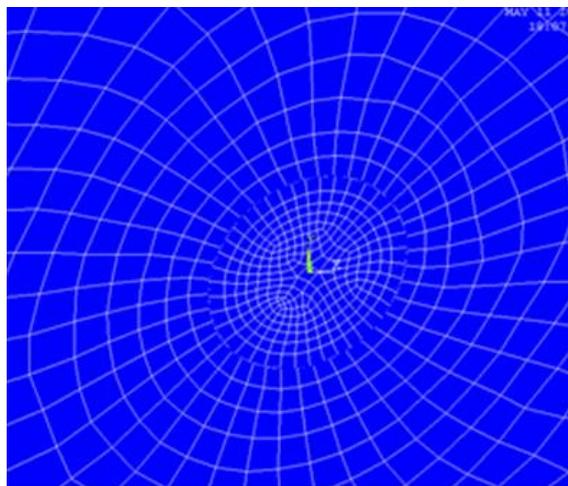
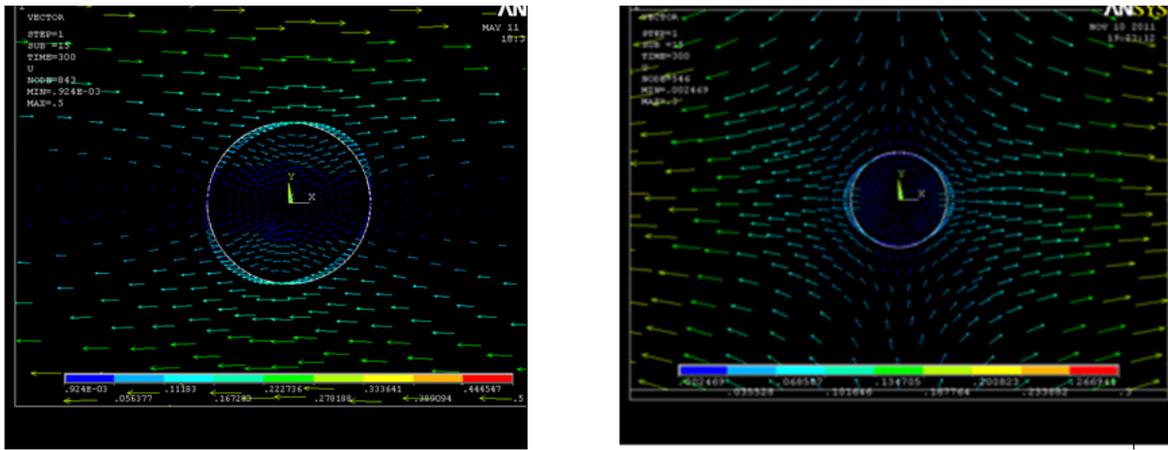


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная сетка после деформации

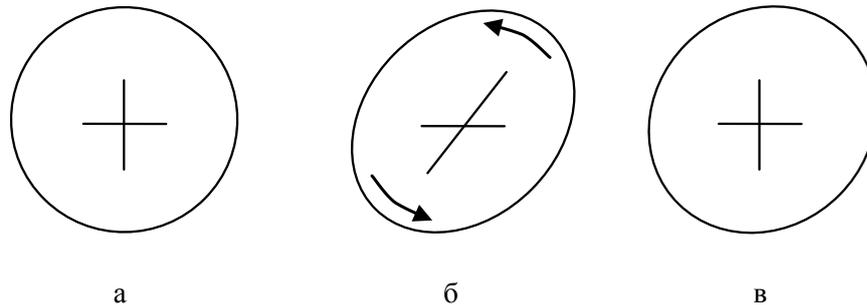


а

б

Рис. 3. Типичные поля смещений при деформации по схеме простого сдвига (а) и плоского удлинения (б)

Численное моделирование показало, что при нагружении системы по двум модам имеются как общие черты, так и различия в поведении включения. Общим является то, что начиная с величины деформации $\gamma^* \sim 10^{-3}$ происходит проскальзывание на некоторых участках границы раздела. С ростом деформации число участков и величина проскальзывания растут. Отличие между двумя вариантами нагружения в том, что если при удлинении пластины проскальзывание на разных участках границы раздела мало и носит случайный характер, то в случае простого сдвига оно скоординировано и приводит к уменьшению деформации сдвига во включении (рис. 4).



а

б

в

Рис. 4. Схема, поясняющая направленный характер проскальзывания по границе раздела включения и матрицы при простом сдвиге пластины: включение до деформации (а); после деформации простого сдвига без возможности проскальзывания (б); после проскальзывания по границе раздела (в). Деформации на схеме значительно преувеличены для выявления сути происходящих процессов.

Включение поворачивается и деформируется так, что в целом это приводит к снижению упругой энергии всей системы. Этот результат легко понять на качественном уровне. Со сдвигом во включении связана упругая энергия $W \sim VE\gamma^2$, где $V = \frac{\pi D^2}{4}$ – объем включения (толщина принята равной 1). Для приращения упругой энергии получаем: $\Delta W \sim L^2 E \gamma \Delta \gamma$. Поворот включения будет происходить, если связанное с ним снижение упругой энергии превышает работу сил трения по границе включения, последнюю можно оценить по формуле: $\Delta A \sim L^2 \tau_0 \Delta \gamma$. Получаем следующее условие начала поворота: $\gamma^* \sim \frac{\tau_0}{E}$, что по порядку величины соответствует значению γ^* , полученному в численном эксперименте.

Выводы

В статье обосновывается возможный критический характер явления идеальной пластичности металлов при низких гомологических температурах. Идеальная пластичность имеет место лишь при простом сдвиге и осуществляется благодаря действию кооперативного механизма, обусловленного перколяцией сдвига по границам зерен. До порога перколяции, деформация металлических материалов при простом сдвиге происходит по тем же механизмам, что и при удлинении. В этом случае обе моды деформации оказывают на металлы практически эквивалентное воздействие в плане деформационного упрочнения.

1. Bridgman P.W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture with Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure. – McGraw-Hill, New York – Toronto – London, 1952.
2. Brandes M. Mechanical Properties of Materials under Hydrostatic Pressure// In. Mechanical Behaviour of Materials under Pressure. Ed.by H.L.L.D.Pugh, Elsevier Publ. Comp. Limited Amsterdam – London – New-York, 1970. – p. 236-298.
3. Jonas J.J., Canova G.R., Shrivastava S.C. and Christodoulou N. Sources of the discrepancy between the flow curves determined in torsion and in axisymmetric tension and compression testing // Proc. Research Workshop on 'Plasticity of Metals at Finite Strain: Theory, Experiment and Computation' Los Angeles, 1981. – p. 206-229.
4. Zhang H.W., Huang X., Hansen N. Evolution of microstructural parameters and flow stresses toward limits in nickel deformed to ultra-high strains// Acta Materialia 56 (2008) 5451–5465.
5. Pippan R., Wetscher F., Hafok M., Vorhauer A., Sabirov I. The Limits of Refinement by Severe Plastic Deformation //Advanced Engineering Materials, v. 8, Issue 11, (2006) 1046–1056
6. Pippan R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A., and Bachmaier A. Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation// Annual Review of Materials Research, V. 40: 319-343 (2010).
7. Bachmaier A., Hafok M., Schuster R. and Pippan R. Limitations in the refinement by severe plastic deformation: the effect of processing // Rev. Adv. Mater. Sci. 25 (2010) 16-22.
8. Segal V.M. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear//Mater. Sci. Eng. A Vol. 338 (2002), p. 331-344.
9. Beygelzimer Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation // Materials Science Forum, Vol. 683 (2011), p. 213-224.
10. Beygelzimer Y., Valiev R.Z., Varyukhin V. Simple Shear: Double-Stage Deformation // Materials Science Forum Vols. 667-669 (2011), p. 97-102.
11. Mindlin R.D., Tiersten H.F. Effect of Coupled-stress in Linear Elasticity// Arch.Rat.Mech.Anal.,11 (1962).
12. Mase G.T., Mase G.E. Continuum mechanics for engineers. – Second ed., CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C., 1999. – 380 p.