

Реологично поведение на олово при аксиално сплескване

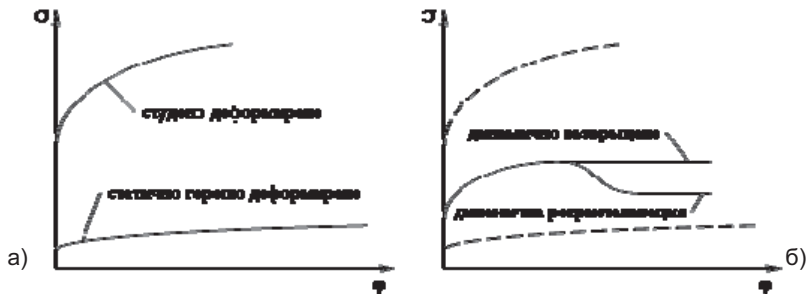
Данаил Господинов, Емил Янков, Валентин Гагов

Rheological Behaviour of Lead at Axial Upsetting: The paper presents some new results about the rheological behaviour of lead at room temperature. Cylindrical specimens are tested by axial compression without friction at several deformation rates using Instron 3384 testing machine. The stress-strain curves obtained from these experiments are non-monotonic ones with a single peak value of stress at certain level of strain. Such a behaviour is typical for the presence of dynamic recrystallization during the deformation and should be taken into account when using lead as model material in studies of deformation processes.

Key words: Lead, Axial Compression Test, Stress-Strain Curve, Dynamic Recrystallization.

ВЪВЕДЕНИЕ

Количественото описание на промените в съпротивлението срещу пластично деформиране на металните материали по време на обработването им има важно значение [5] като едно от съществените предварителни изисквания за ефикасно провеждане на редица дейности, например рационално технологично проектиране на деформационните производствени процеси, коректно числено моделиране [12, 15] на такива процеси, най-често по метода на крайните елементи, както и правилна подготовка, реализация и интерпретация на физически моделни експерименти [2, 3]. Това обяснява засиления интерес през последните години към апроксимативното представяне [6, 12] на експерименталните данни за реологичното поведение на металните материали при пластично деформиране с разнообразни математични модели, подходящи за различни инженерни приложения. С оглед повишаване на точността на математичното моделиране се наблюдават ясно изразени тенденции както към отчитане на някои допълнителни условия при лабораторните изпитвания (бъчвообразност при сплескване, деформационно нагряване), така и към коригиране и усложняване на известните моделни зависимости според физическите механизми на горещо пластично деформиране.



Фиг. 1 Общ вид на зависимостите $\sigma(\phi)$ при студено и горещо деформиране

При студено пластично деформиране [5] преобладават дислокационните механизми на уякчаване и описанието на пластичното течение най-често се извършва във вид на нарастващи монотонно затихващи функции (фиг. 1а) на интензивността на напреженията от интензивността на деформациите $\sigma = \sigma(\phi)$, известни като криви на уякчаване. При горещо деформиране, освен термично обусловеното намаляване на напреженията, едновременно с уякчаването протичат динамични процеси на разуякчаване (възвръщане, рекристализация) и характера на кривите на пластично течение зависи от развитието на тези явления в хода на деформирането. При много бавно натоварване може да протече пълна динамична рекристализация, което да

доведе до елиминиране на ефекта от деформационното уякчаване и да се получи (фиг. 1а) почти постоянно напрежение на пластично течене до много големи деформации. При скорости на деформация, обикновено използвани в практиката, процесите на уякчаване и разуякчаване се конкурират и кривите на пластично течене (фиг. 1б) могат да нарастват до достигане на постоянни напрежения поради динамично възвръщане или, след първоначалното нарастване, да стигнат до намаляване на напреженията поради динамична рекристализация и по-нататък до динамично равновесие между процесите на уякчаване и разуякчаване. Трябва да се отбележи, че настъпването само на динамично възвръщане или с последваща динамична рекристализация зависи както от конкретните температурно-скоростни условия на деформиране, така и от химическия и фазовия състав на обработваната сплав. В общия случай на горещо деформиране моделирането на реологичното поведение на металите $\sigma = \sigma(\varphi, \partial\varphi/\partial t, T)$ включва зависимостта на напрежението σ не само от степента на деформацията φ , както при студено деформиране, но и от интензивността на скоростите на деформация $\partial\varphi/\partial t$ и от температурата T .

Оловото често се използва [3, 4, 8, 14] като моделен материал за лабораторни изследвания на нестационарни деформационни процеси поради подходящите му механични свойства (висока пластичност и ниско съпротивление срещу пластично деформиране при стайна температура), достъпност, лесно изработване на пробни тела и деформиращи инструменти. Тук се разглеждат някои реологични особености на оловото при физическо моделиране на пластичното деформиране на примера на аксиално сплескване на цилиндрични заготовки.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Силовият режим при аксиално сплескване на цилиндрични заготовки може да се изрази в аналитичен вид по метода на тънките сечения [2, 8] чрез опростената зависимост $p = \sigma[1 + (\mu/3)(d/h) = 4F/(\pi d^2)]$, където p е средното контактно налягане, σ – съпротивление срещу пластично деформиране, μ – коефициент на контактно триене, d и h – текущи диаметър и височина на пробата, F – сила за сплескване. Когато експерименталната зависимост $p = p(d/h)$ за оловни пробни тела е близка до линейна функция, тогава лесно могат да се определят числени стойности $\sigma = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ чрез статистически анализ [2] на опитните данни. Наличието на контактно триене предизвиква неизбежна поява на бъчвообразност (фиг. 2) и по тази причина за проба с начални размери $\varnothing d_0 \times h_0$ се приема среден текущ диаметър $d = d_0(h_0/h)^{1/2}$ по принципа за запазване на обема в пластичната област.



Фиг. 2 Оловни проби ($\varnothing 40 \times 38$) при изпитване на натиск без смазване

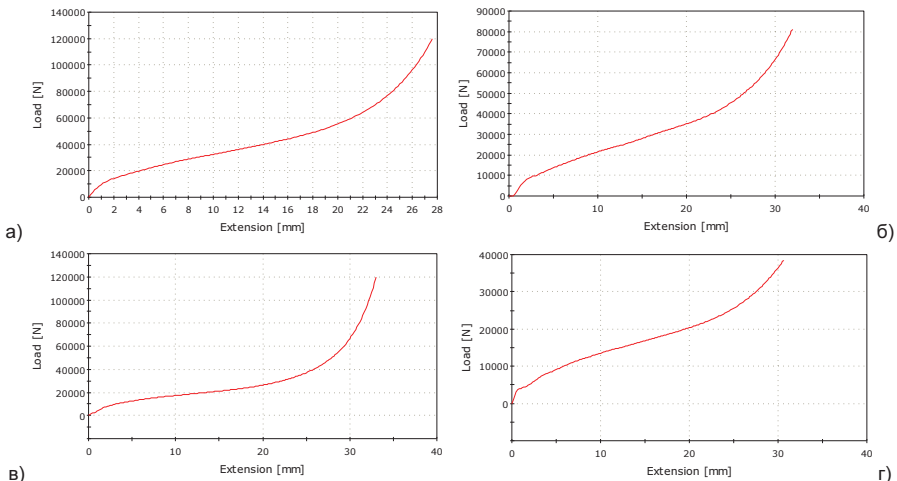
Следващите по-подробни наши изследвания [4] показаха, че съпротивлението срещу пластично деформиране σ на олово при стайна температура проявява явна скоростна чувствителност даже при квазистатично изпитване на натиск, като силата F нараства около 1,2 пъти в интервала на скорости на деформация $0,01 \pm 0,03 \text{ s}^{-1}$. Експериментални резултати $\sigma(\varphi)$ на други автори [14] също показват повишаване на σ на олово до 1,6 пъти при изпитване на усукване със скорости на деформация в интервала $0,02 \pm 6,6 \text{ s}^{-1}$ без коментар на вида на опитните криви на пластично течене.

Освен това друга експериментална зависимост $\sigma(\varphi)$ на независими от нас автори [1, 7] показва силно деформационно уякчаване на оловото при стайна температура и динамично изпитване на натиск.

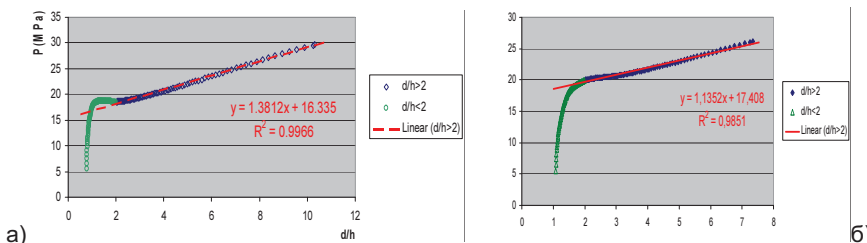
Съществуват няколко методики [9, 10, 11, 13, 15, 16] за отчитане влиянието на контактното триене при изпитване на натиск и съответно коригиране на опитните зависимости $\sigma(\varphi)$, които обаче изискват прецизна експериментална и изчислителна техника. Тук за минимизиране на триенето се използват цилиндрични лети проби с челни струговани вдлъбнатини (фиг. 3), които преди деформирането се запълват с парафин като смазващо вещество за отстраняване на бъчвообразността.



Фиг. 3 Оловни проби за изпитване на натиск без контактното триене



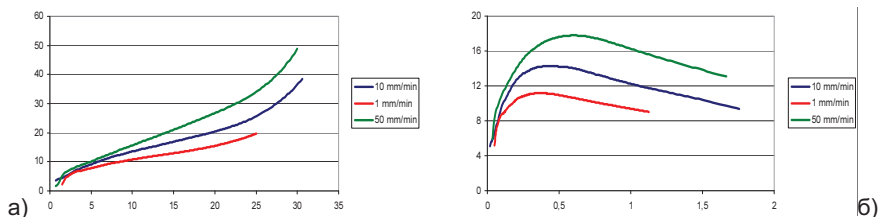
Фиг. 4 Диаграми $F(\Delta h)$ при сплескване на оловни проби със скорост 10 mm/min: а, в - $\varnothing 40 \times 38$ mm; б, г - $\varnothing 30 \times 40$ mm; а, б - без смазване; в, г - без триене



Фиг. 5 Зависимости $p(d/h)$ за проби $\varnothing 30 \times 40$ mm (а) и $\varnothing 40 \times 38$ mm (б) при аксиално сплескване със скорост 10 mm/min без смазване

Изпитвани са проби с размери 40x38 mm и $\varnothing 30 \times 40$ mm при стайна температура (около 22°C). Използвана е изпитателна машина Instron 3384 с числова регистрация

в реално време на времето t , силата F и преместването Δh (180 ± 300 стойности на всеки параметър) в хода на всяко сплескване. Избрани са скорости на деформиране 1 mm/min , 10 mm/min и 50 mm/min при изпитване без триене и само 10 mm/min при изпитване без смазване. Експерименталните зависимости $F(\Delta h)$ на фиг. 4 и фиг. 6а имат общ вид, характерен за изпитването на натиск на пластични материали, като наличието или отсъствието на контактно триене влияе главно върху стойностите на деформиращата сила при еднакво скъсяване. Използването в това изследване на значително повече опитни данни в сравнение с [2] показва (фиг. 5), че линейната зависимост $\rho(d/h)$ е статистически достоверна само за $d/h > 2$ и не дава достатъчно основания да се приема $\sigma = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ за целия деформационен процес.



Фиг. 6 Изпитване с различни скорости без триене ($\varnothing 30 \times 40 \text{ mm}$): а - $F(\Delta h)$, б - $\sigma(\varphi)$

Диаграмите $F(\Delta h)$ при изпитване на натиск без триене (фиг. 6а) потвърждават установената по-рано скоростна чувствителност на оловото при натиск с контактно триене [4] и при усукване [14]. Освен скоростна чувствителност, експерименталните криви $\sigma(\varphi)$ на пластично течение (фиг. 6б) показват немонотонна чувствителност към степента на деформация с характерния вид на горещо пластично деформиране при поява на динамична рекристализация. Подобни по характер резултати са посочени и в [14], но само като опитни входни данни за числено симулиране без коментар на реологичните особености на оловото като материал за физическо моделиране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените деформационни експерименти и посочените резултати показват, че при стайна температура:

- съпротивлението срещу пластично деформиране на оловото е чувствително към степента и скоростта на пластична деформация;
- пластичното деформиране на оловото протича като горещо деформиране в условията на динамична рекристализация.

Тези реологични свойства на оловото следва да се отчитат при сравнителния анализ на резултати от аналитично, физическо и числено моделиране на различни деформационни процеси. Необходими са допълнителни изследвания и натрупване на повече опитни данни за извеждане на подходящ конститутивен модел на оловото при стайна температура, например чрез аксиално сплескване на цилиндрични проби с елиминирани на контактното триене и регистрация на данните в реално време.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Боздуганова В., И. Иванов. Сравнение на числени симулации на ударно пластично деформиране. Научни трудове на РУ „Ангел Кънчев”, Русе, 2011, том 50, серия 2 „Механика и машиностроителни технологии”, 26-32.
- [2] Гагов В. Деформационно-силлови параметри при предварително формообразуване на къси ососиметрични изковки. Известия на Съюза на учените – Русе, 2002, том 4, серия 1 „Технически науки”, 12-17.

[3] Гагов В., Р. Радев. Влияние на уякчаването върху теченето на метала при нестационарно обемно деформиране. Научни трудове на РУ „Ангел Кънчев”, Русе, 2002, том 39, серия 7 „Машиностроителни науки”, 46-50.

[4] Гагов В., Р. Радев, Е. Янков, Д. Господинов. Моделиране на процеса аксиално сплескване на цилиндрични заготовки. Машиностроене и машинознание, 2010, № 11, 68-71.

[5] Гагов В., Р. Радев, Д. Господинов, Е. Янков. Аналитични модели за реологичното поведение на метални материали при горещо деформиране. Сборник доклади от XXVII международна научна конференция МТФ'2012, София, България, том 1, 19-20 октомври 2012, 91-96.

[6] Кривицкий Б., К. Арсентьева. Совершенствование методики определения реологических свойств при математическом моделировании. Инструмент и технологии, 2012, 1, 47-51.

[7] Пенчев Т., И. Иванов, В. Боздуганова. Експериментално и симулационно изследване на обратно изтичане в условията на обикновен и комбиниран удар. Научни трудове на РУ „Ангел Кънчев”, Русе, 2012, том 51, серия 2 „Механика и машиностроителни технологии”, 33-39.

[8] Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки. Машиностроение, Москва, 1965.

[9] Altinbalik T., Y. Can. An upper bound analysis and determination of the barreling profile in upsetting. Indian Journal of Engineering and Materials Science, 2011, vol. 18, 6, 416-424.

[10] Cetinarlan C. S. Effect of aspect ratio on barreling contour and variation of total surface area during upsetting of cylindrical specimen. Materials and Design, 2007, vol. 28, 1907-1913.

[11] Li Y. P., E. Onodera, H. Matsumoto, A. Chiba. Correcting the stress-strain curve in hot compression process to high strain level. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, vol. 40, 4, 982-990.

[12] Lin Y. C., X. M. Chen. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working. Materials and Design, 2011, vol. 32, 1733-1759.

[13] Majd H. M., M. Poursina, K. H. Shirazi. Determination of barreling curve in upsetting process by artificial neural networks. Proceedings of the 9th International Conference on Simulation, Modelling and Optimization, Budapest, Hungary, 03-05 September 2009, 271-274.

[14] Pop M., D. Frunza, A. Neag. Experimental and numerical aspects regarding lead alloy plastic deformation. Romanian Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics, 2012, vol. 57, 1, 71-83.

[15] Semiati S. L., T. Altan. Measurement and Interpretation of flow stress data for the simulation of metal-forming processes. Interim Report AFRL-RX-WP-TP-2010-4072, Air Force Research Laboratory and The Ohio State University, Ohio, 2010.

[16] Solhjo S. Evaluation of coefficient of friction in bulk metal forming. Preprint arXiv:1402.6749, 2014 (<http://arxiv.org/abs/1402.6749>).

За контакти:

Доц. д-р Данаил Д. Господинов, катедра МТМ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888209, e-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

Ас. маг. инж. Емил Хр. Янков, катедра МТМ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888209, e-mail: eyankov@uni-ruse.bg

Доц. д-р Валентин Ив. Гагов, катедра МТМ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888778, e-mail: gag@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.