

ТРИМЕРЕН ДЕФОРМАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА ПРОЦЕСА ХИДРАВЛИЧНО ИЗДУВАНЕ

Емил ЯНКОВ
eyankov@uni-ruse.bg

Александър ИВАНОВ
akivanov@uni-ruse.bg

Валентин ГАГОВ
gag@uni-ruse.bg

катедра МТМ, Русенски университет „Ангел Кънчев”, Русе 7017, БЪЛГАРИЯ

Изпитването на листови метални материали чрез хидравлично издуване често се използва за оценка на деформационното уякчаване и граничните деформации. Тук се обсъжда възможността за деформационен анализ на процеса чрез тримерно двустранно сканиране на изпитваната проба с оглед на по-подробно описание на формата на деформирания купол.

Ключови думи: хидравлично издуване, деформационен анализ, тримерно сканиране

1. Увод

Технологичното обработване на листовите метални материали чрез различни операции на пластично деформиране най-често се извършва в условията на сложно напрегнато състояние в пластичните зони. Поради относително малката дебелина на заготовките обикновено се приема, че деформирането се осъществява при двумерно напрегнато състояние, при което се реализира тримерно деформирано състояние вследствие на принципа за запазване на обема. Според вида и параметрите на съответната технологична операция в заготовката се образуват една или повече зони на пластично състояние, в които най-често разпределението на напреженията и деформациите има неравномерен (в границите на пластичната зона) и нестационарен (по време на процеса) характер.

Пластичното деформиране на листови метали в условията на двумерен опън чрез хидравлично формоване (издуване) се прилага в практиката както за производство [Ершов 1990, Lang et al. 2004, Zhang et al. 2004] на пространствени изделия, така и за механични и технологични изпитвания [Аверкиев 1985, Borsellino et al. 2001, Гагов 2003, Гагов 2004] на такива материали при сложно напрегнато състояние. Напоследък производственото приложение на този метод съществено се разширява с използването на вискозни предаващи среди [Wang X. et al. 2004, Wang Z. et al. 2004] и за обработване на тръбни заготовки [Lang et al. 2004]. При изпитване на двумерен опън методът намира приложение за

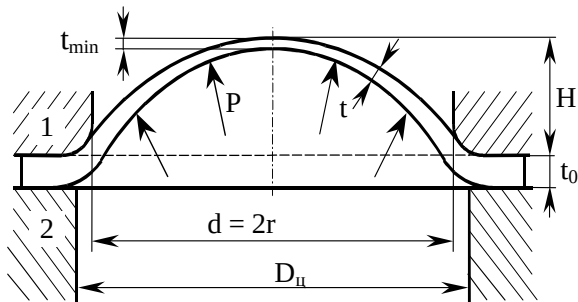
определяне характеристиките на механичните свойства [Щеглов 1960, Щеглов 1965, Фесчиев и др. 2004] на листовите метали и за построяване [Аверкиев 1985, Atkinson 1997, Banabic et al. 2002, Gagov et al. 2003] диаграмите на гранична деформация и на деформационно уякчаване.

Изпитването на листови метални материали на двумерен опън е твърде важно, защото, от една страна, такова натоварване е характерно за пластичната зона от обработваното изделие в редица операции на листово деформиране и, от друга страна, при него листовите метали могат да понесат значително по-високи напрежения и деформации, отколкото обикновено се достигат при обичайното изпитване на едномерен опън. Известни са още две други схеми за изпитване [Аверкиев 1985, Banabic et al. 2002, Гагов и др. 2003] на двумерен опън – дълбоко изтегляне на пробно тяло с отвор и двупосочно разтегляне на кръстовидно пробно тяло. При първия от тези методи напреженията не могат да бъдат точно определени и той се използва за сравнителна оценка на граничните деформации и качеството на листовите материали. Вторият метод изисква оптимизирани проби и специално изпитвателно оборудване, като засега се прилага главно за построяване на повърхнината на пластично течение.

2. Схема и параметри на процеса

Схема на хидравлично издуване в кръгли матрици е показана на фиг. 1. Фланецът на изпитваното пробно тяло се фиксира между

матрицата 1 и цилиндъра 2 по такъв начин, че да се издува само средната част на пробата без намаляване на нейния начален външен размер. Известни са [Muzyka 2001, Boulila A. et al. 2002, Янков и др. 2006] някои приспособления към изпитвателни машини и специални уредби за изпитване по този метод. Под действието на контролирано хидравлично налягане P пробата с начална дебелина t_0 се деформира в матрица с диаметър d до текущата височина H и текущата дебелина $t_{\min}$ в полюса на деформираното пробно тяло.



Фиг. 1. Изпитване чрез хидравлично издуване

Механично изпитване на двумерен опън чрез хидравлично издуване може да се провежда не само в кръгли матрици, но [Banabic et al. 1999, Rees 1995] и в матрици с елиптичен отвор. В последния случай се реализира натоварване на двумерен неравномерен опън, което позволява изследване поведението на листовите метали при различни съотношения на нормалните ($\sigma_1/\sigma_2 > 1$, $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$) напрежения. Възможно е да бъде приложено статично или динамично натоварване, като при статично изпитване се препоръчва [Gutscher 2004] и използването на предаваща среда от хидропластмаса.

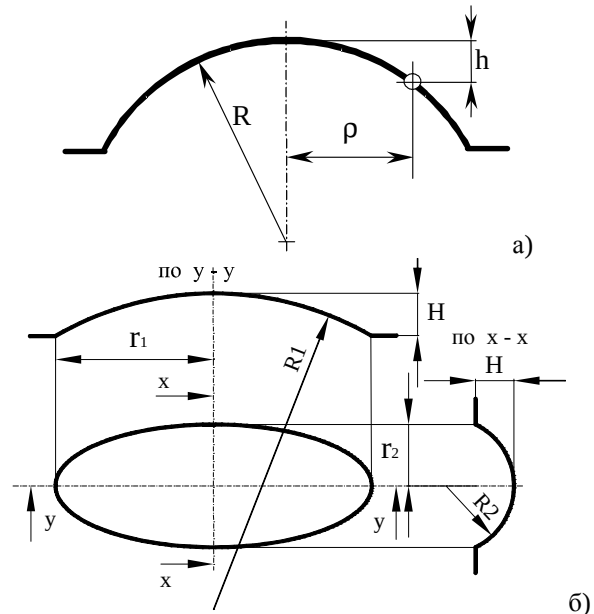
3. Напрегнато и деформирано състояние

В процеса на пластично деформиране по метода на хидравлично издуване измененията на напреженията и деформациите зависят от три групи взаимно свързани фактори, както следва:

- геометрия на деформираната заготовка в зависимост от използвания инструмент (d или $d_1 > d_2$ при кръгли или елиптични матрици), от приложеното натоварване и от механичните свойства на деформирания метал;
- стойност и характер (статично, динамично) на приложеното натоварване;
- механично поведение на листовия метал (характеристики на механичните му свойства, интензивност на деформационното уякчаване, нормална и равнинна анизотропия).

При провеждането на всяко едно механично изпитване, в това число при разглежданото

хидравлично издуване, трябва предварително да се познава (или еднозначно да се определи от опитните данни) характера на напрегнато и деформирано състояние в изпитваната част на пробното тяло. Това е необходимо за коректното пресмятане и следващия обоснован анализ на експерименталните резултати.



Фиг. 2. Профили на деформирана проба в кръгли (а) и елиптични (б) матрици

Формата на купола (изпъкналата част на деформираната проба) при изпитване в кръгли матрици най-често се приема като част от сфера. Профилът в меридионално сечение на купола е схематично представен на фиг. 2а и радиусът на апроксимиращата сфера R може да се пресметне в първо приближение като $R = (r^2 + H^2)/(2H)$. Аналогично при изпитване с използването на елиптични матрици (фиг. 2б) главните сечения се апроксимират като окръжности с радиуси $R_1 = (r_1^2 + H^2)/(2H)$ и $R_2 = (r_2^2 + H^2)/(2H)$.

Напреженията и деформациите в полюса на пробата могат да се определят по формулите $\sigma_1 = \sigma_2 = PR/(2t_{\min})$ и $\epsilon_3 = -\ln(t_{\min}/t_0)$ при изпитване в кръгли матрици или с помощта на съотношенията

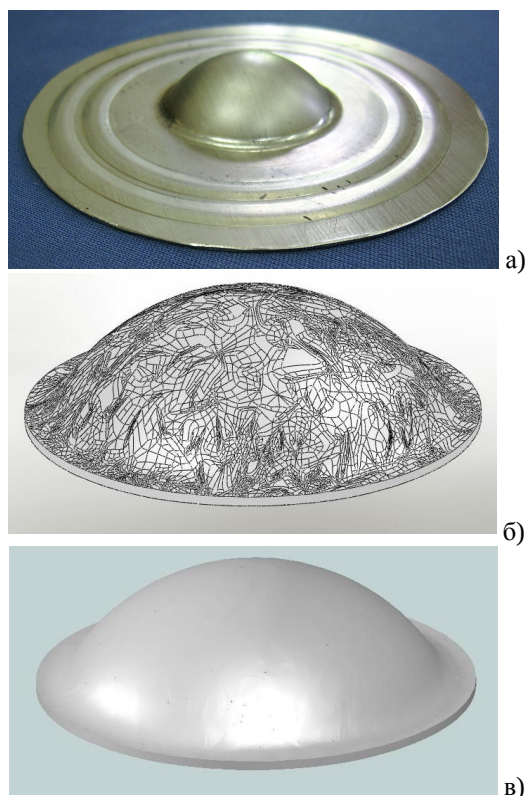
$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} &= \frac{P}{t_{\min}} \\ \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} &= \frac{2\epsilon_2 + \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} = \frac{1 + 2\beta}{2 + \beta} = \text{const} \\ \beta &= \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{(2\alpha - 1)}{(2 - \alpha)} = \text{const} \end{aligned} \right\}$$

при изпитване в елиптични матрици. Чрез тези съотношения е възможно [Gagov et al. 2003] да се определят напреженията и деформациите и за точки от деформирания профил извън полюса.

Формално уточняване на пресмятанията за R , σ и ε е предложено от редица автори [Rees 1995, Atkinson 1997, Boulila 2002] на базата на данни от измерване на деформирания купол.

Подобен преглед на известните и прилагани зависимости за пресмятане и анализ на опитни резултати при изпитването чрез хидравлично издуване е направен [Янков 2006, Янков и др. 2006] по-рано. Тук е съществено да отбележим, че точността на изчислителните формули силно зависи от действителното разпределение на деформациите [Mutrux 2008, Slota 2008] по деформирания купол, но такива изследвания, например по метода на координатните мрежи, на практика са трудни и продължителни задачи за експериментално изпълнение.

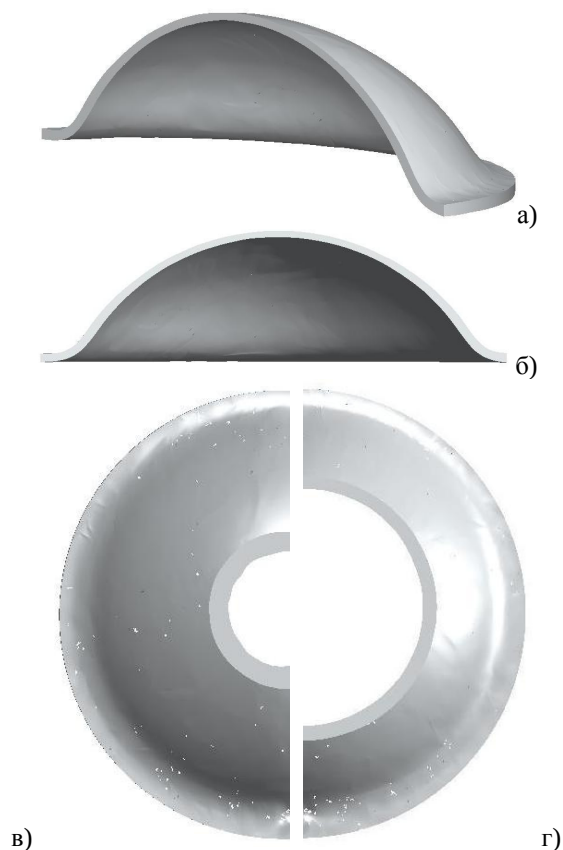
Във връзка с изложените общи съображения тук са представени предварителни резултати от собствени експерименти за регистриране и анализ на деформираните проби в тримерни декартови координати. Извършено е тримерно сканиране с разделителна способност 0,01 mm на избрани пробни тела [Янков и др. 2006] от стомана 08X18H10T в състояние на доставка с дебелина 0,83 mm без наличие на съществена равнинна анизотропия.



Фиг. 3. Деформирано пробно тяло
реална проба (а) и САD модели (б, в)

Примери за получените опитни резултати са показани на фиг. 3 и фиг. 4. Числените данни за сканираните точки от външната и вътрешната страна на всяка деформирана проба с помощта

на сплайн-функции (фиг. 3б) са преобразувани в тримерни повърхнинни модели (фиг. 3в) с САD системата SolidWorks.



Фиг. 4. САD сечения на сканирана проба
(а, б – вертикални; в, г – хоризонтални)

Съчетаването на повърхнинните модели за външната и вътрешната страна на всяка проба позволява да се генерират (фиг. 4) и анализират различни сечения след определени етапи на изпитване. Това дава нови широки възможности за числено изследване, например, на формата на деформирания купол и промените в дебелината по профила на пробата във вертикално сечение, на формата на избрани хоризонтални сечения и др. Подобни систематизирани експериментални данни могат да бъдат особено важни както за избор, обосновка и уточняване на изчислителни зависимости, така и за подробно изясняване на влиянието на деформационното уякчаване и на анизотропията върху резултатите от изпитване на листови метали чрез хидравлично издуване.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверкиев А. Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. Машиностроение, Москва, 1985.
- Гагов В., Д.-С. Комса. Методи за механични и технологични изпитвания на листови материали. Машиностроителна техника и технологии, 2003, 4, 53-58.

- Гагов В. Изпитване на листови метали чрез хидравлично формоване. Известия на Съюза на учените, Русе, 2004, серия 1, 5, 5-10.
- Ершов В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. Машиностроение, Москва, 1990.
- Фесчиев Н., В. Гагов. Хидростатично и хидродинамично изпитване на листови метали. Научни труд. на РУ "А. Кънчев", 2004, 41, 7, 108-112.
- Щеглов Б. А. К вопросу об испытании листовой стали на двухосное растяжение методом гидравлической вытяжки. Исследования в области обработки металлов давлением, Изд. АН СССР, Москва, 1960, 38-44.
- Щеглов Б. А. Оценка механических свойств листовых металлов при гидравлических испытаниях. Исследование процессов пластической деформации металлов, Наука, Москва, 1965, 14-23.
- Янков Е, В. Гагов, Д. Господинов, Б. Сакакушев. Физическо и числено моделиране при изпитване на листови материали чрез хидравлично издуване. Машиностроение и машинознание, 2006, 1, 110-113.
- Янков Е. Аналитично определяне на напреженията и деформациите при хидравлично формоване. Сборник докл. от Вторя нац. студ. научно-техн. конф., ТУ, София, 2006, 225-230.
- Янков Е, В. Гагов. Геометричен анализ на процеса хидравлично формоване. Известия на Съюза на учените, Сливен, 2006, том 11, 2, 44-47.
- Atkinson M. Accurate determination of biaxial stress-strain relationships from hydraulic bulging tests of sheet metals. Int. J. of Mechanical Sciences, 1997, 39, 7, 761-769.
- Banabic D. et al. Closed-form solution for bulging through elliptical dies. Proc. of 7th Sheet Metal Conf., Erlangen, 1999, 623-628.
- Banabic D. et al.. Recent anisotropic yield criteria for sheet metals. Proc. of the Romanian Academy (series A), 2002, 3, 3, 91-98.
- Borsellino C. et al. Analysis of material formability in sheet hydroforming. Proc. of 5th AITEM Conf., 2001, 2, 493-502.
- Boulila A. et al. Experimental validation of a spherical model of circular thin plates under hydraulic pressure. Mecanique & Industries, 2002, 3, 627-638.
- Gagov V. et al. Strain hardening evaluation by bulge testing of sheet metals. Proc. of 12th AMME Conf., Gliwice-Zakopane, 2003, 331-334.
- Gutscher G., H.-C. Wu, G. Ngaile, T. Altan. Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge test. J. of Materials Processing Technology, 2004, 146, 1-7.
- Lang L. H. et al. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. J. of Materials Processing Technology, 2004, 151, 165-177.
- Mutruх A., B. Hochholdingер, P. Hora. A procedure for the evaluation and validation of the the hydraulic biaxial experiment. Proc. of the 7th Int. Conf. Numisheet, Interlaken, 2008, 67-71.
- Muzyka N. R. Equipment for testing sheet structural materials under biaxial tension. Strength of Materials, 2001, 33, 5, 503-507.
- Rees D. W. A. Plastic flow in the elliptical bulge test. Int. J. of Mechanical Sciences, 1995, 37, 4, 373-389.
- Slota J., E. Spisak. Determination of flow stress by the hydraulic bulge test. Metalurgija, 2008, 47, 1, 13-17.
- Zhang S. H. et al. Recent developments in sheet hydroforming technology. J. of Materials Processing Technology, 2004, 151, 237-241.
- Wang X. Y. et al. Sheet bulging experiment with a viscous pressure-carrying medium. J. of Materials Processing Technology, 2004, 151, 340-344.
- Wang Z. J. et al. Viscous pressure forming (VPF): state-of-the-art and future trends. J. of Materials Processing Technology, 2004, 151, 80-87.

3D DEFORMATION ANALYSIS OF THE HYDRAULIC BULGING PROCESS

Emil YANKOV, Aleksandar IVANOV, Valentin GAGOV

The sheet metal testing by hydraulic bulging is often used for evaluation of the work hardening curves and the forming limit diagrams. Here is discussed the opportunity for deformation analysis of this process by 3D inside and outside scanning of the testing specimen with a view to description of the shape of the deformed dome in more details.

Key words: hydraulic bulging, deformation analysis, 3D scanning