

Опит за дефиниране на оптимизационна задача за определяне на качеството на изделието при процес на дълбоко изтегляне

Светлана Паскалева

An attempt for definition of an optimization problem to determine the quality of the product in the process of deep drawing.: An attempt to define an window of plastical deformability is presented in this article. Based on that, an objective function for investigating the quality of the detail, based on numerical simulations, is suggested. The results of optimizations, started using this objective function are discussed. The influence of some factors on the quality of the detail is examined.

Key words: Wrinkling, Deep drawing process simulation, Forming Limit Curve (FLC)

I. ВЪВЕДЕНИЕ

Постигането на качествен резултат е от особена важност при проектиране на процес на дълбоко изтегляне. То оказва директно влияние върху количеството брак и себестойността на крайния продукт и затова изследванията в тази област са многобройни. Правени са опити за намиране на подходяща целева функция за количествено определяне на критерий за качество. Като критерий за скъсване в [12] е използвана сумата от разстоянията от всяка точка в опасната област зад граничните криви на деформация (Forming Limit Curves - FLC) до граничната крива, претеглени по обема на крайния елемент. Стойността на критерия става равна на нула ако качеството е добро и никоя точка не се намира в опасната област. Критерият в този случай играе ролята на наказателна функция, чиято стойност се увеличава при постигане на нежелан резултат. Критерият за нагъване се определя чрез гранична линия, съответстваща на постоянната деформация по посока на дебелината. Той се изчислява като сума на разстоянията от точките в опасната зона до линията. Подобен подход, използван в [7] и [8], позволява изобразяването на точки, съответстващи на състоянието на деформацията.

Средно квадратично отклонение на дебелината на образца се използва като целева функция в [10] и [11] за оптимизация на процес на дълбоко изтегляне като равномерната дебелина се явява изискване за качество.

В [5] целевата функция е базирана на FLC, като крайната допустима стойност отстои на 20% от кривата. Под линията на постоянната дебелина на материала има опасност от нагъване. В [10] е разгледана система за проектиране на оптимален процес чрез числени симулации. Целева функция е отклонението на дебелината на изделието от средната дебелина като за променливи при проектирането се използват височините на поансона. В [6] е представено средство за предсказване на нагъване по фланеца и скъсване при формообразуващи операции на листов материал, основано на числена симулация на процеса за еласто-пластичен модел.

II. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРОЗОРЕЦ НА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМИРУЕМОСТ

След въвеждане на диаграмите на гранични деформации се стига до идеята [9] за определяне на прозорец на деформируемост в пространството на главните деформации. Той е затворен от границите на повреждане, съответстващи на локално изтъняване, скъсване или нагъване по фланеца. Влиянието на свойствата на материала върху формата му може да бъде предвидено [9]. Комбинацията от параметри, които осигуряват успешна формообразуваща операция и продукт с приемливо качество се определя като „прозорец на пластична деформируемост”.

С помощта на компютърни симулации е определен този прозорец за технологичен процес на дълбоко изтегляне на цилиндрична чаша. Дефектите, които са изследвани, са поява на пукнатина, нагъване по фланеца и изтъняване.

На база на предишни изследвания ([1], [2], [3]) е намерен аналитичен израз на всяка от кривите, описващи прозореца (фиг. 1), където

$$a(\varepsilon_2) = \begin{cases} 0.57944 * \varepsilon_2^2 - 0.82846 * \varepsilon_2 + 0.54323, \varepsilon_2 < 0 \\ -3.6713 * \varepsilon_2^2 + 1.072 * \varepsilon_2 + 0.56707, \varepsilon_2 \geq 0 \end{cases}, \quad \text{е FLD крива,}$$

$b(\varepsilon_2) = 0.8 * a(\varepsilon_2)$, е 80% от FLD (Счита се, че детайлът ще бъде качествен, ако деформацията е под 80% от FLD [5],[10]).

$$c(\varepsilon_2) = -35.673 * \varepsilon_2^3 - 20.798 * \varepsilon_2^2 - 5.103 * \varepsilon_2 - 0.34866, \text{ нагъване, сила на притискане } 1.8 \text{ kN}$$

$$d(\varepsilon_2) = -43.585 * \varepsilon_2^3 - 20.581 * \varepsilon_2^2 - 4.0518 * \varepsilon_2 - 0.20514, \text{ нагъване, сила на притискане } 1.5 \text{ kN}$$

$$e(\varepsilon_2) = -56.796 * \varepsilon_2^3 - 28.463 * \varepsilon_2^2 - 5.7242 * \varepsilon_2 - 0.3266, \text{ нагъване, сила на притискане } 1.2 \text{ kN}$$

$$f(\varepsilon_2) = -53.694 * \varepsilon_2^3 - 22.673 * \varepsilon_2^2 - 4.0596 * \varepsilon_2 - 0.18226, \text{ нагъване, сила на притискане } 1.0 \text{ kN}$$

$$g(\varepsilon_2) = \begin{cases} -\varepsilon_2, \varepsilon_2 < 0 \\ \varepsilon_2, \varepsilon_2 \geq 0 \end{cases}, \quad \text{диагонална права за 1 и 2 квадрант}$$

Функциите $c(\varepsilon_2), d(\varepsilon_2), e(\varepsilon_2), f(\varepsilon_2)$ могат да бъдат обединени като

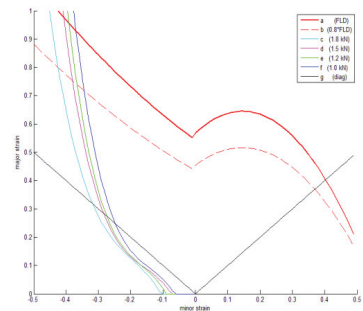
$$h(f_h, \varepsilon_2) = \{ f(\varepsilon_2), f_h \leq 1.0 \text{ kN}, e(\varepsilon_2), 1.0 \text{ kN} < f_h \leq 1.2 \text{ kN}, d(\varepsilon_2), 1.2 \text{ kN} < f_h \leq 1.5 \text{ kN}, c(\varepsilon_2), 1.5 \text{ kN} < f_h \}$$

Допускания и ограничения на модела:

Игнорирана е формулираната в [4] закономерност, че кривата на гранична деформация (FLD) за локално изтъняване зависи от дебелината на заготовката. Ако такива криви са налични, те могат да бъдат използвани аналогично на начина, по който се използват фамилията криви $h(f_h, \varepsilon_2)$.

Фамилията криви в $h(f_h, \varepsilon_2)$ е ограничена до 1.5kN, но моделът позволява да бъдат добавени и допълнителни, без това да се отрази на бързодействието.

$a(\varepsilon_2)$ е калибрирана с адитивен коефициент -0.2, за да съответства по-точно на използвания в симулациите материал.



Фиг.1 Прозорец на пластична деформируемост

III. ОПТИМИЗАЦИОННА ЗАДАЧА ЗА ОЦЕНКА НА КАЧЕСТВОТО НА ИЗДЕЛИЕТО

За симулиране на процеса на дълбоко изтегляне е използван Метод на крайните елементи. Дебелината на листовия материал е управляем параметър на задачата за оптимизация, заедно с радиусите на закръгление, определящи геометрията на инструментите – поансон и матрица. Текущото разстояние w , измерено по някоя от осите в пространството на главните деформации до ограниченията, определени от дефектообразуването е избрано за целева функция. Използвани са предварително определените гранични криви от нагъване (WLC) чрез симулации по МКЕ при различни сили на притискане на притискача към заготовката и гранични криви на скъсване. Изследвани са елементи от МКЕ мрежата, разположени на характерни места – по периферията на заготовката и в областта, където се наблюдава скъсване. Чрез тяхното изследване се наблюдават и двата дефекта – нагъване и изтъняване / скъсване.

Управляваните параметри, обект на оптимизацията са:

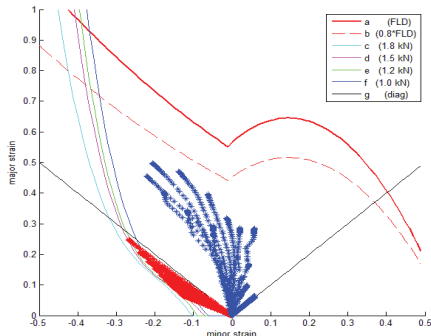
f_h – сила на притискане; t_b – дебелина на заготовката; r_p – радиус на закръгление на поансона; r_d – радиус на закръгление на матрицата.

Изследвано е влиянието на варируемостта на коефициента на триене и дебелината на заготовката върху процес на дълбоко изтегляне.

Да се намери минимум на целевата функция

$$w_i(f_h, t_b, r_p, r_d) = \begin{cases} \max_value_W, \varepsilon_{1i} \leq h(f_h, \varepsilon_{2i}) \\ \max_value_W, \varepsilon_{1i} < g(\varepsilon_{2i}) \\ \max_value_F, \varepsilon_{1i} > b(\varepsilon_{2i}) \\ b(\varepsilon_{2i}) - \varepsilon_{1i}, h(f_h, \varepsilon_{2i}) < \varepsilon_{1i} \leq b(\varepsilon_{2i}) \end{cases} \quad (1)$$

$$0.6mm \leq t_b \leq 1.2mm, 1.0kN \leq f_h \leq 20.0kN, 1.0mm \leq r_p \leq 2.0mm, 2.5mm \leq r_d \leq 4.0mm$$



Фиг.2. Пътища на деформация на крайни елементи без дефекти

$b(\varepsilon_{2i}) = 0.8 * a(\varepsilon_{2i})$. Това съответства на стремежа да се постигнат максимални напрежения, близки до FLD, защото в противен случай конструираният процес не е оптимален и следва да се внесат изменения, за да се намали преразходът на материал [4]. Функцията (1) се отнася за един краен елемент. При изследване на множество от n крайни елементи за резултат на функцията трябва да се приеме най-малкият от постигнатите резултати, освен ако не е наблюдавано излизане извън прозореца на пластична деформируемост:

$$w(f_h, t_b, r_p, r_d) = \begin{cases} \max_value_F, w_i(f_h, t_b, r_p, r_d) = \max_value_F, i = 1..n \\ \max_value_W, w_i(f_h, t_b, r_p, r_d) = \max_value_W, i = 1..n \\ \min(w_i(f_h, t_b, r_p, r_d), i = 1..n \end{cases} \quad (2)$$

Проверка на модела

С цел валидиране са изследвани няколко крайни елемента от модела и тяхното поведение при тестова симулация на дълбоко изтегляне. Получените резултати на целевата функция са сравнени с резултатите от симулацията визуално с пост-процесора на LS-DYNA.

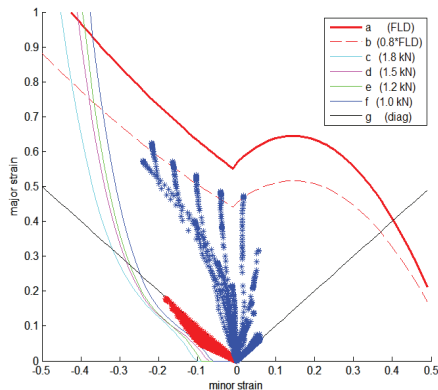
Тестови случаи:

а) Без дефекти: Стойностите на деформациите $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ доближават, но не преминават съответната ограничителна крива за нагъване (фиг. 2). Те са сравнително далеч от кривата $b(\varepsilon_2) = 0.8 * a(\varepsilon_2)$.

б) Приближаване до $b(\varepsilon_2) = 0.8 * a(\varepsilon_2)$: Стойностите на деформациите $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ доближават, но не преминават кривата $b(\varepsilon_2) = 0.8 * a(\varepsilon_2)$.

в) Изтъняване: В пост-процесора на LS-DYNA се наблюдава нормално изтегляне. Но поради преминаване над кривата $b(\varepsilon_2) = 0.8 * a(\varepsilon_2)$ (фиг. 3), стойността на $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ приема граничната стойност $w(f_h, t_b, r_p, r_d) = 300$.

където: i е номер на изследвания краен елемент; $\max_value_W = 100$, $\max_value_F = 300$ са достатъчно големи, наказателни (penalty) стойности, имащи за цел да „удържат“ оптимизацията в рамките на прозореца на пластична деформируемост; $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ са главни деформации на наблюдавания елемент. $b(\varepsilon_2), g(\varepsilon_2), h(\varepsilon_2)$ са аналитичните функции, описващи прозореца на пластична деформируемост. Целевата функция изразява качеството на крайното изделие (по-малка стойност на целевата функция означава по-добър резултат). Стойността γ определя разстоянието до кривата

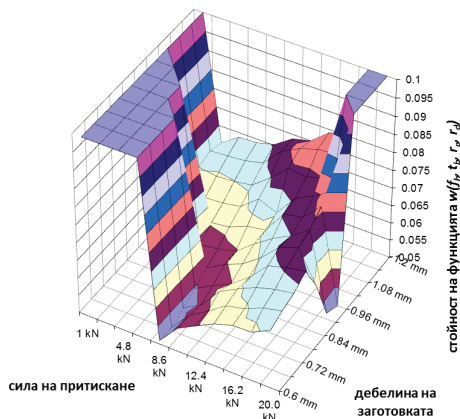


Фиг.3 Пътища на деформация на крайни елементи с изтъняване.

оптимизация.

Оптимизация и резултати:

За по-подробно изследване на областта на изменение на параметрите са изпълнени 121 (11x11) изчисления на функцията $w(f_h, t_b)$ с равномерни стъпки за



Фиг.4 Изменение на функцията $w(f_h, t_b)$ в изследвания диапазон.

Оптимизационната задача е нелинейна. Основни причини за това са контактът между заготовката и инструментите, който е източник на нелинейност поради граничните условия, които се изменят при натоварване[55], пластичната деформация на заготовката по време на формообразуване и нагъването на фланеца.

За определяне минимума на функцията (2) е разработен програмен модул, използващ стандартната функция за многомерна оптимизация с ограничения

г) Скъсване: Стойностите на деформациите $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ преминават съответната ограничителна крива за скъсване. Стойността на $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ приема граничната стойност $w(f_h, t_b, r_p, r_d) = 300$. В пост-процесора на LS-DYNA се наблюдава скъсване на заготовката.

д) Нагъване: Стойностите на деформациите $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ преминават съответната ограничителна крива за нагъване. Стойността на $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ приема граничната стойност $w(f_h, t_b, r_p, r_d) = 100$. В пост-процесора на LS-DYNA се наблюдава нагъване..

Резултатите от изследванията показват, че поведението на целевата функция $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ съответства на получените резултати от симулацията, и че тя може да бъде използвана за

изменение на параметрите са сила на притискане и дебелина на заготовката, за дефинираната област на изменение и фиксирани стойности за останалите изследвани параметри.

От резултатите за областта на изменение на тези параметри (фиг. 4) се вижда, че граничните стойности са подбрани удачно: при долната граница на диапазона на изменение на силата на притискане работва критерият за нагъване, а над горната граница – за скъсване.

Проведено е търсене на оптимално решение на дефинираната целева функция (2). Една симулация на процеса продължава приблизително 20 секунди на компютър с двудърен процесор Intel i5/2.67 GHz.

fmincon от пакета Optimization Toolbox на MATLAB. Поради характера на целевата функция не е възможно да бъдат изчислени производните на функцията.

Първо е изпълнена оптимизация с целева функция $w(f_h, t_b)$ при фиксирани стойности за радиусите на закръгление на поансона r_p и на матрицата r_d . Локален оптимум е намерен след 12 итерации, включващи 98 изчисления на целевата функция, отнемащи 7-8 минути на средно мощен компютър. Изследването на междинните изчисления показва, че в някои случаи граничните криви на прозореца на пластична деформируемост са достигнати и получаването по-голям ("наказателен") резултат от целевата функция правилно „насочва“ процеса на търсене на оптимална стойност.

Вторият етап на изследването включва търсене на оптимална стойност на функцията $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ с променяне на 4-те параметъра на целевата функция.

Извършени са две стартирания на оптимизацията по $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ с различни стартови стойности. В първия случай е достигнат локален минимум, който е по-лош от достигнатия при оптимизация с фиксирани радиуси на закръгление. При втората оптимизация е открит локален оптимум след 7 итерации, включващи 72 изчисления на целевата функция. Този път резултатът е по-добър от постигнатия и представлява нов локален минимум на целевата функция $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$.

IV. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

От направените изследвания се вижда, че в рамките на дефинираната област на изменение на управляваните параметри, функцията $w(f_h, t_b, r_p, r_d)$ е непрекъсната. Тя може да бъде използвана за оценка на качеството на изделието при изследване за робастност на процеса. Извършените оптимизации показват приемливо бързодействие и ефективно насочване на процеса при достигане на границите на прозореца на пластична деформируемост.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Паскалева С. , И. Иванов. Определяне на допустимите стойности на притискащата сила при дълбоко изтегляне чрез компютърни симулации. Научни трудове том 44, Серия 2, РУ "Ангел Кънчев", Русе. 2005. ISSN 1311-3321, стр.169-174.
- [2] Паскалева С. , И. Иванов, Г. Попов. Изследване на влиянието на геометрията на инструмента върху възможността за дълбоко изтегляне. Сборник доклади на научна конференция, РУ "Ангел Кънчев", Русе. 2006. ISSN 1311-3321, стр.276-280.
- [3] Паскалева С. , И. Иванов, Г. Попов. Изследване на влиянието на геометрията на инструмента върху възможността за дълбоко изтегляне. Сборник доклади на научна конференция, РУ "Ангел Кънчев", Русе. 2006. ISSN 1311-3321, стр.276-280.
- [4] Banabic, D., Sheet Metal Forming Processes, Springer, Heidelberg 2010
- [5] Bonte, M., Voogard, A., Carleer, B. Optimising towards robust metal forming processes Ninth ESAFORM Conference on Material Forming, Glasgow, UK. 2006
- [6] Cao J., M. Bojce, A predictive tool for delaying wrinkling and tearing failures in sheet metal forming. Transactions of ASME vol.119, 1997 pp. 354-364
- [7] Gantar G., K. Kuzman, Sensitivity and stability evaluation of the deep drawing process. Journal of Materials Processing Technology, 125-126 2002 pp. 302-308
- [8] Gantar G., K. Kuzman, B. Filipic, Increasing the stability of the deep drawing process by simulation-based optimization. Journal of Materials Processing Technology, 164-165 2005 pp. 1343-1350
- [9] Hosford W. , Duncan J., Sheet Metal Forming: A Review. Journal JOM, 51 (11) 1999 pp. 39-44

[10] Ohata T., Y. Nakamura, T. Katayama, E. Nakamachi, K. Nakano, Development of optimum process design system by numerical simulation. Journal of Materials Processing Technology. 60, 1996 pp. 543-548

[11] Ohata, T., Nakamura, Y., Katayama, T., Nakamachi, E., Omori, N.: Improvement of optimum process design system by numerical simulation. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80–81 1998 pp. 635–641

[12] Schenk, O. Hillmann, M. Optimal design of metal forming die surfaces with evolution strategies. Composite Structures, Vol. 82 2004 pp. 1695–1705

За контакти:

ас. д-р инж. Светлана Паскалева, Добруджански технологичен колеж гр. Добрич, e-mail: spaskaleva@abv.bg

Докладът е рецензиран.