

УДК 621.7.043

Орлюк М. В.

ГРАНИЧНІ ЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ РУЙНУВАННЯ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ВИТЯГУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ DEFORM

На сучасному етапі розвитку машинобудування для прогнозування можливості виготовлення деталей методами пластичного формування без руйнування, для забезпечення підвищених вимог до якості та експлуатаційної довговічності, оптимізації технологічних процесів (зменшення кількості переходів та штампового оснащення) все ширше використовують комп'ютерні системи моделювання (QForm, DEFORM, FORGE та ін.) процесів обробки металів тиском, які базуються на методі скінчених елементів.

Хоча сучасні програми моделювання дозволяють визначити компоненти напружено-деформованого стану виробу в довільний момент технологічного процесу в будь-якій матеріальній точці та зазвичай мають механізми для прогнозування руйнування матеріалу в процесі деформування (критерії руйнування), але чіткі рекомендації по вибору граничних значень критеріїв руйнування для оцінки ймовірності руйнування матеріалу відсутні.

Програмний комплекс DEFORM завдяки високій достовірності одержуваних результатів широко використовується для попереднього комп'ютерного моделювання як об'ємних формоутворюючих операцій, так і операцій штампування листового матеріалу.

Для оцінки можливості руйнування в процесі деформування при моделюванні в DEFORM традиційно використовують енергетичні критерії руйнування (Normalized Cockcroft-Latham, Cockcroft-Latham, Brozzo, Ayada та ін.) [1–3]. Енергетичні критерії дозволяють достатньо адекватно оцінювати можливість руйнування твердих тіл при монотонних процесах пластичного деформування з відносно нескладною траєкторією деформації. Вони відносно прості і, як правило, не потребують додаткових досліджень механічних властивостей матеріалу. При використанні даних критеріїв моменту руйнування матеріалу відповідає момент досягнення розрахованого значення критерію певного граничного (критичного) значення:

$$C_p = C_{кр} \cdot \quad (1)$$

При цьому головною проблемою для прогнозування моменту руйнування є відсутність чітких рекомендацій по вибору критичних значень критеріїв. А якщо рекомендації і існують, то рекомендовані критичні значення можуть змінюватись в широкому діапазоні. Так для критерію Normalized Cockcroft-Latham граничні значення знаходяться в межах 0,1...0,5 [4, 5] і залежать від схеми напруженого стану.

Крім того граничні значення критеріїв руйнування у більшості випадків визначаються для стандартних механічних випробувань зразків, в яких схеми напружено-деформованого стану відрізняються від схем у реальних процесах.

Тому для отримання реальних критичних значень бажано проводити натурний експеримент технологічного процесу, що планується досліджувати, з граничними ступенями деформації або більшими (довести матеріал до руйнування), а за результатами моделювання відповідного процесу встановити критичне значення обраного критерію руйнування.

Мета роботи – визначення на основі натурального експерименту по вісесиметричному витягуванню за результатами комп'ютерного моделювання в DEFORM граничних значень критеріїв руйнування Normalized Cockcroft-Latham та Brozzo.

В рамках досліджень можливості інтенсифікації процесу витягування за рахунок використання попередньо спрофільованих заготовок [6] досліджувався також процес витягування без потоншення не спрофільованих заготовок із сталі 20. Товщина вихідного матеріалу

становила 2,5 мм. Витягування здійснювалось у матрицю діаметром 48,25 мм пуансоном діаметром 42,25 мм. Радіус заокруглення матриці – 10 мм (4S), пуансона – 5 мм (2S). Зусилля притискання фланця коливалося у межах 4000...5000 Н.

Були виконані експерименти по витягуванню із плоскої заготовки з різними ступенями деформації. За результатами експериментів отримані діаграми «зусилля-переміщення» (рис. 1) та визначено граничний коефіцієнт витягування для заданих умов деформування.

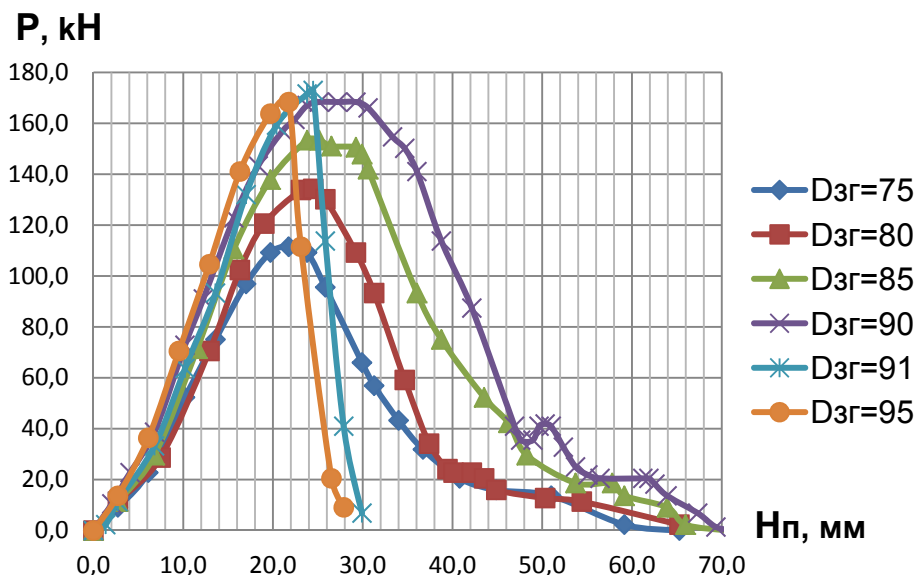


Рис. 1. Діаграми «зусилля-переміщення» витягування плоских заготовок із сталі 20

Як видно з рисунку, витягування заготовки діаметром $D_{\text{зг}} = 90$ мм відбувається практично за такого самого зусилля, що і руйнування заготовок діаметром 91 та 95 мм (приблизно 170 кН). Тому коефіцієнт витягування:

$$m = \frac{d_{\text{cp}}}{D_{\text{зг}}} = \frac{45,75}{90} = 0,508 = m_{\text{зг}} \quad (2)$$

може вважатись граничним (мінімально допустимим) для даних умов деформування.

На підставі отриманих експериментальних даних було проведено комп'ютерне моделювання процесу витягування у середовищі DEFORM 3D та 2D для заготовок діаметром 90, 91 та 95 мм (для максимально можливого ступеня деформації та ступенів деформації, що викликають руйнування матеріалу відповідно). Матеріал заготовки розглядався як абсолютно пластичний.

За результатами 2D-моделювання витягування заготовок діаметром 90 та 91 мм відбулось без руйнування, а при витягуванні заготовок діаметром 92 (додатковий експеримент) та 95 мм відбулось руйнування напівфабрикату. Отримані результати моделювання представлені на рис. 2.

Зусилля витягування (максимальне) становило 175...177 кН, граничний коефіцієнт витягування за результатами моделювання склав:

$$(m_{\text{зг}})_{2D} = \frac{d_{\text{cp}}}{D_{\text{зг}}} = \frac{45,75}{91} = 0,503. \quad (3)$$

При 3D-моделюванні у місці контакту заготовки з радіусною кромкою пуансона сітка була примусово ущільнена для збільшення кількості елементів у зоні розташування небезпечного перерізу (не менше п'яти елементів по товщині) з ціллю підвищення точності результатів.

Результати чисельного експерименту практично повністю співпали з результатами натурного експерименту (витягування заготовки діаметром 90 мм відбулось без руйнування, а збільшення діаметру заготовки призвело до руйнування напівфабрикату).

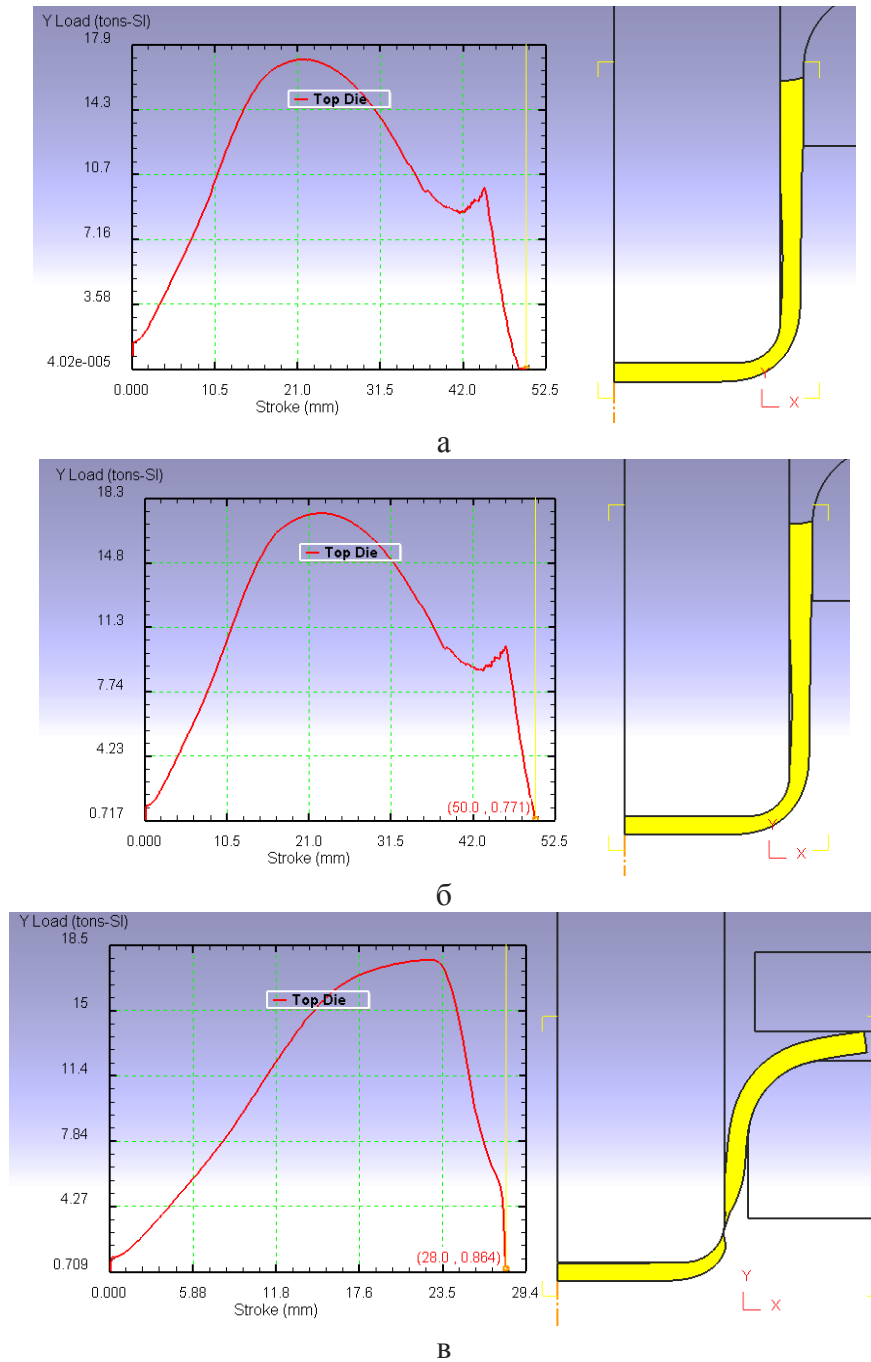


Рис. 2. Результати 2D-моделювання процесу витягування:

а – заготовки діаметром 90 мм; б – заготовки діаметром 91 мм; в – заготовки діаметром 92 мм

Діаграми «зусилля-переміщення», отримані за результатами 3D-моделювання, зображені на рис. 3.

Максимальне зусилля витягування за результатами 3D-моделювання дорівнює 176...179 кН (відхилення від фактичного складає ~5%), а граничний коефіцієнт витягування співпав з фактичним:

$$(m_{zp})_{3D} = m_{zp} = 0,508. \quad (4)$$

Суттєво відрізняються лише величини переміщень витяжного пуансона, що відповідають максимуму фактичних та отриманих моделюванням зусиль витягування. Ймовірно даний незбіг можна пояснити тим, що при моделюванні матеріал заготовки розглядався як абсолютно пластичний.

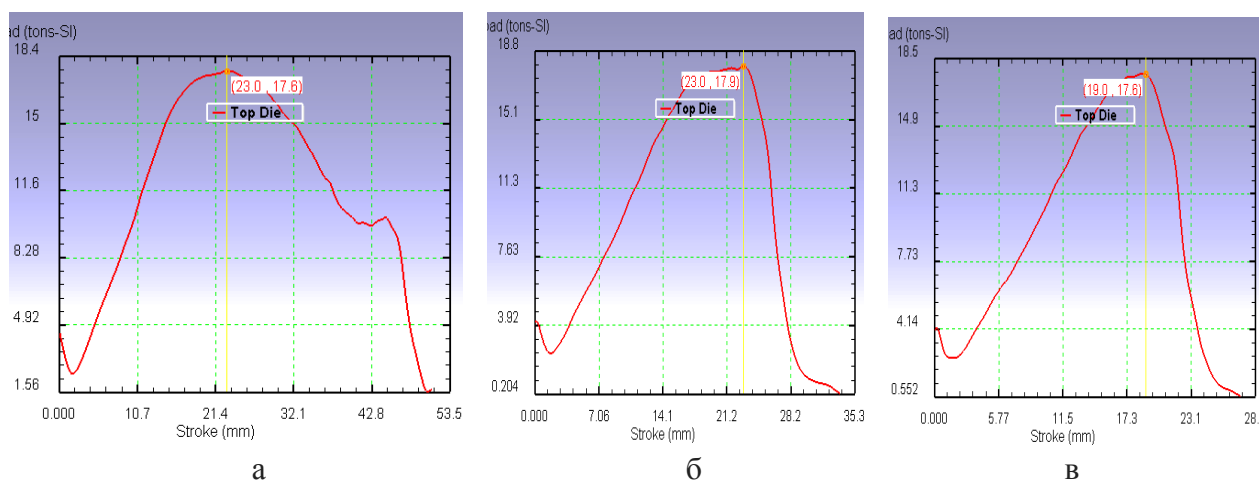


Рис. 3. Діаграми «зусилля-переміщення» за результатами 3D-моделювання процесу витягування:

а – заготовки діаметром 90 мм; б – заготовки діаметром 91 мм; в – заготовки діаметром 95 мм

В подальших дослідженнях визначались критичні значення критеріїв Normalized Cockcroft-Latham та Brozzo, які відповідають граничним ступеням деформації та руйнуванню сталі 20 в процесі витягування. Дані критерії руйнування були вибрані з огляду на те, що при моделюванні в DEFORM для оцінки вірогідності руйнування за замовчуванням використовується критерій Normalized Cockcroft-Latham, а використання критерію Brozzo рекомендується для аналізу процесів листового штампування. Крім того критичні значення критерію Brozzo для процесів ОМТ зазвичай близькі до 1, що адекватно сприймається дослідниками, які використовують для оцінки можливості руйнування деформаційні критерії.

Критерій Cockcroft-Latham ґрунтується на значенні енергії деформації на одиницю об'єму. Нормалізований варіант цього критерію (Normalized Cockcroft-Latham, [7]) записується у вигляді:

$$C = \int \frac{\bar{\sigma}}{\sigma^*} d\bar{\varepsilon}, \quad (5)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена пластична деформація;
 $d\bar{\varepsilon}$ – приріст накопиченої деформації;
 σ^* – максимальне головне напруження;
 $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень.

Критерій Brozzo [8] встановлює залежність руйнування від максимального головного напруження та гідростатичного напруження (тиску):

$$C = \int \frac{\bar{\sigma}}{3(\sigma^* - \sigma_m)} d\bar{\varepsilon}, \quad (6)$$

де σ_m – гідростатичне напруження.

Традиційно критичні значення критерію руйнування при моделюванні визначають на кроці, який відповідає моменту фактичного руйнування матеріалу під час натурального експерименту. В нашому випадку при витягуванні заготовки діаметром 91 мм руйнування відбулось на переміщенні пуансона 24,5 мм, заготовки діаметром 95 мм – на переміщенні 21,8 мм. Ці переміщення відповідають максимуму відповідних «P-H»-діаграм (рис. 1).

Картини розподілу значень критеріїв руйнування в момент руйнування заготовок діаметром 91 та 95 мм за результатами 3D-моделювання представлені на рис. 4 та 5 відповідно.

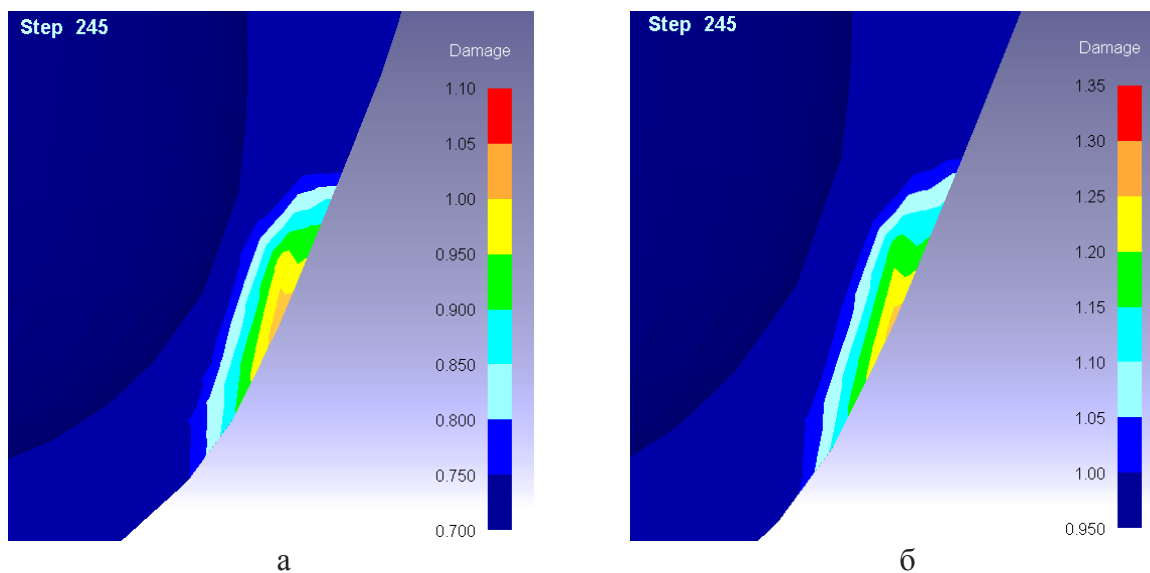


Рис. 4. Розподіл значень критеріїв руйнування в момент руйнування заготовки діаметром 91 мм:

а – Normalized Cockcroft-Latham; б – Brozzo

Як видно з рис. 4, критичне значення, при якому відбувається руйнування заготовки діаметром 91 мм, для критерію Normalized Cockcroft-Latham становить $1 \dots 1,05$, для критерію Brozzo – $1,25 \dots 1,3$. При витягуванні заготовки діаметром 95 мм критичне значення критерію Normalized Cockcroft-Latham знаходиться в межах $1,35 \dots 1,4$, Brozzo – $1,5 \dots 1,55$ (рис. 5).

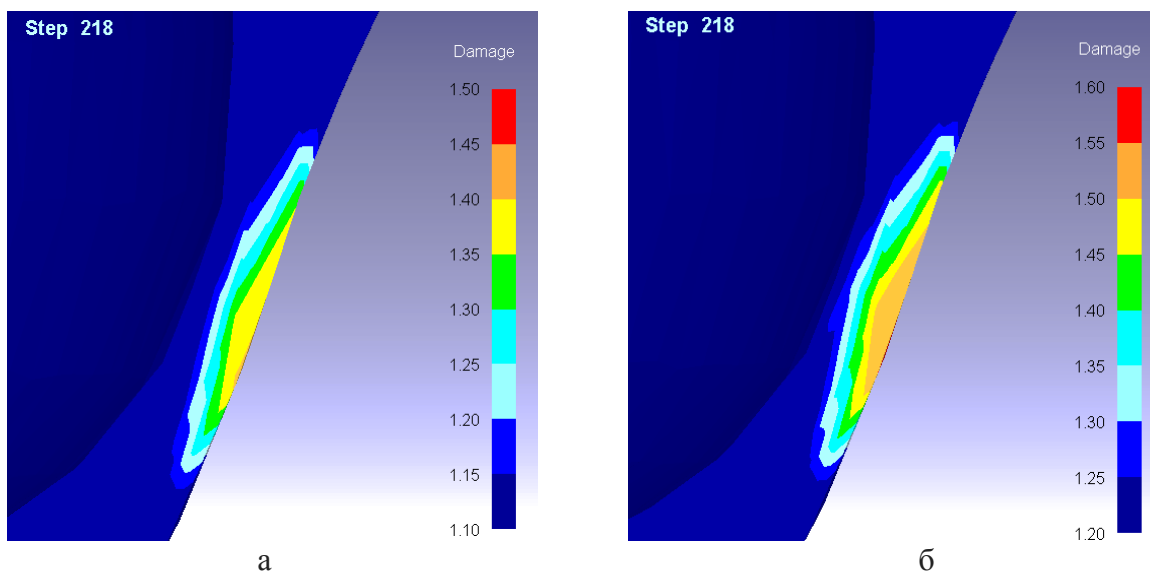


Рис. 5. Розподіл значень критеріїв руйнування в момент руйнування заготовки діаметром 95 мм:

а – Normalized Cockcroft-Latham; б – Brozzo

Отримані значення в першому та другому випадку суттєво відрізняються, хоча за логікою мали би бути однаковими. Одним з пояснень такої невідповідності може бути неточність у визначенні моменту, що відповідає руйнуванню та значна деформація елементів сітки в зоні розташування небезпечного перерізу. Тому такий підхід для визначення критичних значень критерію руйнування можна рекомендувати лише за умови точної фіксації моменту руйнування заготовки.

При деформуванні пластичних матеріалів руйнуванню матеріалу передують стадії локалізації пластичної деформації (при випробуванні на розтяг в зразках перед руйнуванням утворюється шийка). Тому з технологічної точки зору важливіше спрогнозувати момент початку руйнування (момент початку локалізації деформації), а не момент самого руйнування, або встановити граничні параметри процесу, при яких деформування відбувається без руйнування.

В нашому випадку без руйнування відбувається витягування заготовки діаметром 90 мм при значеннях критерію Normalized Cockcroft-Latham 0,58...0,6 (рис. 6, а), Brozzo – 0,74...0,76 (рис. 6, б).

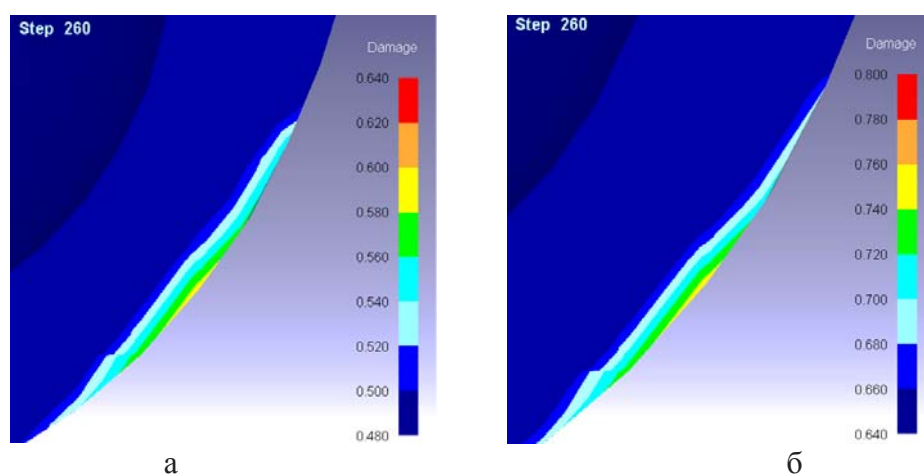


Рис. 6. Розподіл граничних значень критеріїв руйнування при витягуванні заготовки діаметром 90 мм:

а – Normalized Cockcroft-Latham; б – Brozzo

При витягуванні заготовки діаметром 91 мм локалізація деформації починається на 228 кроці моделювання (рис. 7). Для даного кроку середнє значення критерію Normalized Cockcroft-Latham коливається в межах 0,64...0,68 (рис. 8, а), критерію Brozzo – 0,82...0,86 (рис. 8, б).

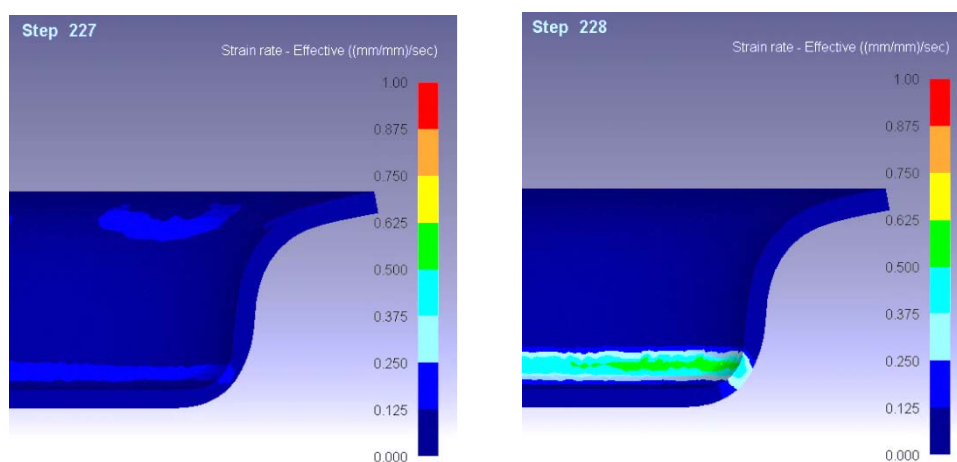


Рис. 7. Розподіл інтенсивності швидкості деформації при витягуванні заготовки діаметром 91 мм

При витягуванні заготовки діаметром 95 мм в момент початку локалізації деформації середнє значення критерію Normalized Cockcroft-Latham знаходиться в межах 0,58...0,62, критерію Brozzo – 0,77...0,79.

Аналізуючи отримані результати 3D-моделювання, можна зробити висновок, що реальний процес витягування буде протікати без руйнування, якщо при моделюванні розраховані значення критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham не перевищують 0,6, критерію Brozzo – 0,75. Якщо розраховані значення відповідних критеріїв перевищують вказані величини, вірогідність руйнування різко зростає.

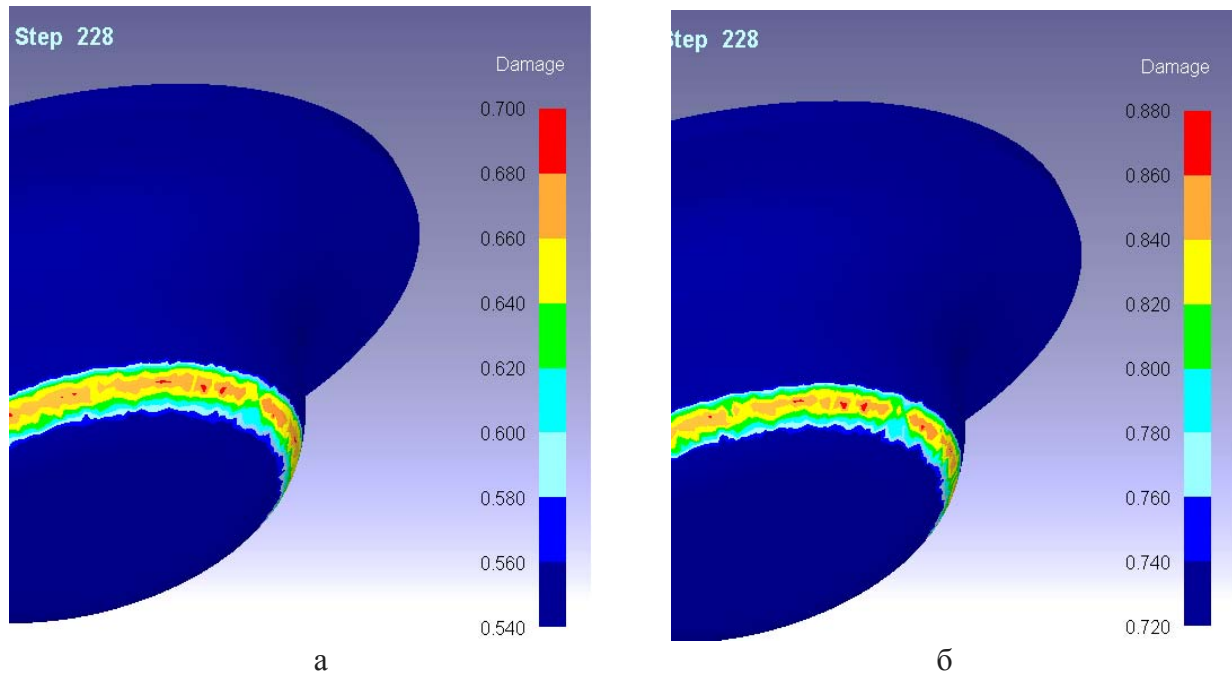


Рис. 8. Розподіл значень критеріїв руйнування при витягуванні заготовки діаметром 91 мм в момент локалізації деформації:

а – Normalized Cockcroft-Latham; б – Brozzo

Також за результатами числових експериментів встановлено, що при моделюванні в DEFORM 2D граничні значення критерію Normalized Cockcroft-Latham знаходяться в межах 0,5...0,55, критерію Brozzo – 0,65...0,7.

ВИСНОВКИ

В статті проведено порівняльний аналіз експериментальних даних та результатів комп'ютерного моделювання процесу витягування циліндричного стакану із сталі 20 з метою визначення граничних критеріїв руйнування. Отримані числові значення критеріїв Normalized Cockcroft-Latham та Brozzo дозволяють за результатами моделювання прогнозувати поведінку пластичних металів та визначити допустимі коефіцієнти витягування в реальних процесах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харсеев В. Е. Макроскопические феноменологические модели и теории разрушения обработки металлов давлением / В. Е. Харсеев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 90–96.
2. К вопросу выбора критериев разрушения при математическом моделировании процессов обработки давлением в современных программных комплексах / М. П. Барышников, М. В. Чукин, А. Б. Бойко, Н. Н. Ильина // *Обработка сплошных и слоистых материалов.* – 2014. – № 1 (40). – С. 48–55.
3. Guntram Ruf. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working / Ruf Guntram, Sommitsch Christof, Bruno Buchmayr // *Steel Grips. Journal of Steel and Related Materials.* – 2006. – № 4. – S. 56–63.

4. Бенъ І. В. Вплив параметрів сітки скінчених елементів при моделюванні процесу вирубання деталей в середовищі DEFORM 3D / І. В. Бенъ, М. В. Орлюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 47(1166). – С. 11–14.
5. Уманский А. А. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла при сортовой прокатке / А. А. Уманский, В. Н. Кадыков, Ю. А. Мартыанов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 4 (6). – С. 8–11.
6. Орлюк М. В. Інтенсифікація витягування порожнистих тонкостінних виробів з використанням профільованих заготовок : дис... канд. техн. наук : 05.03.05 / Орлюк Михайло Володимирович ; Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – К., 2005. – 196 с.
7. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. (1968). Ductility and workability of metals, *L Inst. Metals.* – Vol. 96. – P. 33–39.
8. Brozzo P. A new method for the prediction of formability limits of metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina // *Proceedings of the 7th biennial congress in International Deep Drawing Research Group.* – 1972. – P. 3.1/3.5.

REFERENCES

1. Harseev V. E. Makroskopicheskie fenomenologicheskie modeli i teorii razrusheniya obrabotki metallov davleniem / V. E. Harseev // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov.* – Kramatorsk : DGMА, 2013. – № 3 (36). – S. 90–96.
2. K voprosu vybora kriteriev razrusheniya pri matematicheskom modelirovanii processov obrabotki davleniem v sovremennyh programmnyh kompleksah / M. P. Baryshnikov, M. V. Chukin, A. B. Bojko, N. N. Il'ina // *Obrabotka sploshnyh i sloistyh materialov.* – 2014. – № 1 (40). – S. 48–55.
3. Guntram Ruf. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working / Ruf Guntram, Sommitsch Christof, Bruno Buchmayr // *Steel Grips. Journal of Steel and Related Materials.* – 2006. – № 4. – S. 56–63.
4. Ben' I. V. Vpliv parametriv sitki skinchenih elementiv pri modeljuvanni procesu virubuvannja deta-lej v seredovishhi DEFORM 3D / I. V. Ben', M. V. Orljuk // *Visnik Nacional'nogo tehcnichnogo universitetu «HPI» : zbirnik naukovih prac'.* Serija: Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. – Harkiv : NTU «HPI», 2015. – № 47(1166). – S. 11–14.
5. Umanskij A. A. Zakonomernosti formirovaniya naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri sortovoj prokatke / A. A. Umanskij, V. N. Kadykov, Ju. A. Mart'janov // *Vestnik Sibirskogo gosudar-stvennogo industrial'nogo universiteta.* – 2013. – № 4 (6). – S. 8–11.
6. Orljuk M. V. Intensifikacija vitjaguvannja porozhnistih tonkostinnih virobiv z vikoristannjam profil'ovanih zagotovok : dis... kand. tehn. nauk : 05.03.05 / Orljuk Mihajlo Volodimirovich ; Nacional'nij tehcnichnij un-t Ukraini "Kiivs'kij politehnicnij in-t". – K., 2005. – 196 s. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. (1968). Ductility and workability of metals, *L Inst. Metals.* – Vol. 96. – P. 33–39.
7. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. (1968). Ductility and workability of metals, *L Inst. Metals.* – Vol. 96. – P. 33–39.
8. Brozzo P. A new method for the prediction of formability limits of metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina // *Proceedings of the 7th biennial congress in International Deep Drawing Research Group.* – 1972. – P. 3.1/3.5.

Орлюк М. В. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського».

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

E-mail: minorkpi@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 06.04.2017 р.