

УДК 621.961.01

І. В. БЕНЬ, М. В. ОРЛЮК

### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СІТКИ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ ВИРУБУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩІ DEFORM 3D

В роботі досліджується вплив параметрів моделювання процесу вирубування (пробивання) в програмному середовищі DEFORM 3D на достовірність результатів, для оцінки результатів використані експериментальні та теоретичні дані. Для порівняння обрано найбільш важливі параметри процесу завдяки яким можна провести аналіз. Відзначається значний вплив параметрів сітки скінчених елементів на результати моделювання, так для отримання достовірних результатів сітка має складатись із рівновісних елементів, ущільнених в осередку деформації.

**Ключові слова:** вирубка, комп'ютерне моделювання, DEFORM 3D, сітка скінчених елементів, критерій руйнування, деформація, компоненти напружень, перестроювання сітки, сколююча тріщина.

**Вступ.** Останнім часом при розробці технологічних процесів виготовлення складних деталей і проектуванні штампового оснащення все частіше використовується попереднє комп'ютерне моделювання формують операцій у середовищі DEFORM 3D. Завдяки високій достовірності одержуваних результатів моделювання дозволяє встановити нові особливості та закономірності процесів, які аналітично і експериментально визначити складно, а іноді й неможливо.

Отримані в результаті моделювання дані можуть бути використані і для вирішення актуальної проблеми підвищення точності штампованих деталей, в тому числі деталей, що отримують вирубуванням (пробиванням). Підвищення якості і точності виробів на стадії вирубування дозволяє зменшити або повністю усунути витрати на подальшу обробку деталей з метою підвищення їх точності, що веде до значної економії, особливо в масовому та серійному виробництві.

**Мета дослідження.** Основною задачею даного дослідження є встановлення достовірності результатів моделювання процесу вирубування (пробивання) в середовищі DEFORM 3D відносно експериментальних та класичних теоретичних даних з метою подальшого використання моделювання для встановлення особливостей процесу вирубування (пробивання) та визначення параметрів, що впливають на точність деталей, що виготовляються.

**Результати дослідження.** Моделювання у середовищі DEFORM 3D виконувалось після попереднього експерименту по вирубуванню круглої деталі діаметром 21.6 мм. Вирубування здійснювалось з різними зазорами (з оптимальним зазором  $Z_{opt}$ , з зазорами більше та менше оптимального [1]), матеріал вихідної заготовки – смуга із сталі 45 товщиною 5 мм. Результати експерименту представлені на рис. 1. Як видно з рисунку, геометрія та форма бічної поверхні отриманих деталей повністю відповідають даним літературних джерел [1–7], а саме: при зазорі меншому за оптимальний на бічній поверхні деталі утворюється подвійний блискучий пояс (рис. 1, а), що виникає при прошовуванні деталі крізь

матрицю; при оптимальному зазорі утворюється єдина поверхня сколювання (рис 1, б); зі збільшенням зазору (рис. 1, в) спостерігається збільшення викривлення деталі.

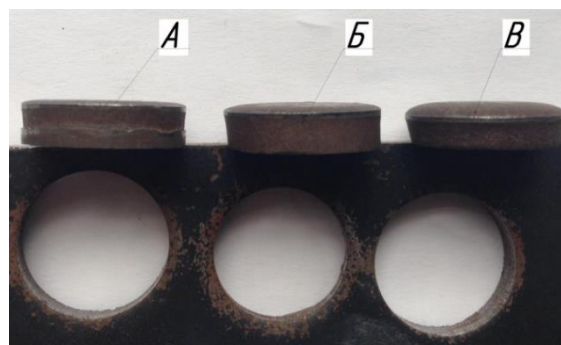


Рис. 1 – Деталі після вирубування з різним зазором  
А –  $z < Z_{opt}$ , Б –  $z = Z_{opt}$ , В –  $z > Z_{opt}$

Оскільки вирубування-пробивання необхідно виконувати за оптимальних зазорів між пуансоном і матрицею, тому подальше моделювання та порівняння з отриманими результатами виконано для процесу вирубування з оптимальним зазором.

При моделюванні матеріал розглядався як пружно-пластичний, а кількість (розмір) елементів при побудові сітки вибиралась із умови не менше 5-ти елементів по товщині заготовки [8–10]; перебудова сітки відбувалась при відносній величині деформації елемента більшою ніж 0,7.

Результати моделювання представлені на (рис. 2–6).

Отримані результати моделювання показали, що на кінцевий результат суттєво впливають параметри вихідної сітки (розмір та форма елементів) та поведінка сітки після перебудови. Значне збільшення розмірів елементів сітки після її перебудови призводить до суттєвої зміни розрахованих значень компонент напружено-деформованого стану (рис. 2–5) та стрибків значень на графіку технологічного зусилля (рис. 6), що в кінцевому результаті зменшує точність проведених розрахунків.

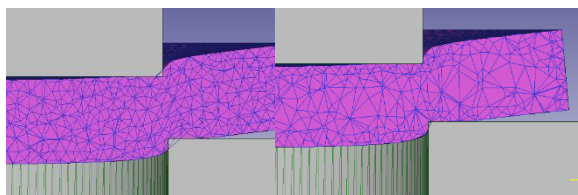


Рис. 2 – Загальний вигляд сітки кінцевих елементів в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

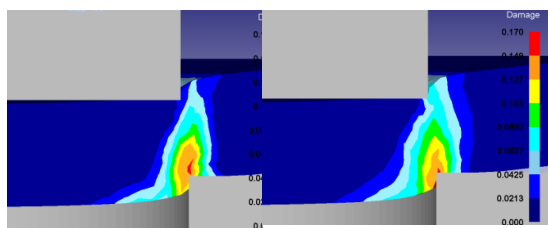


Рис. 3 – Розподіл критерія руйнування в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови

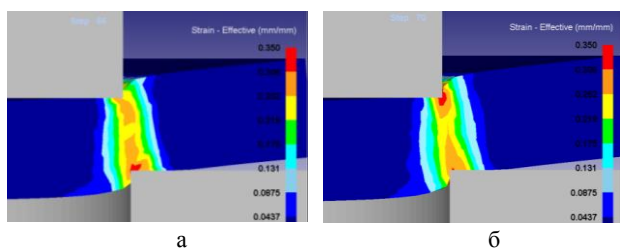


Рис. 4 – Розподіл інтенсивності деформацій в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

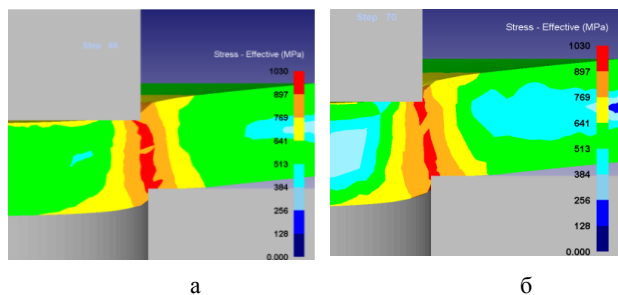


Рис. 5 – Розподіл інтенсивності напружень в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

Крім того значення критерію руйнування (Cockroft@Latham) в момент руйнування становлять 0,17...0,23, хоча в літературних джерелах [8–10] зустрічається значення 0,4.

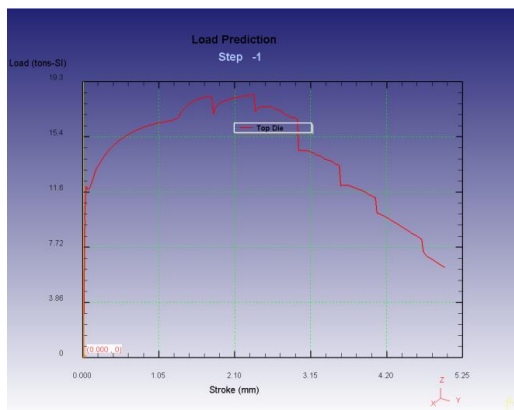
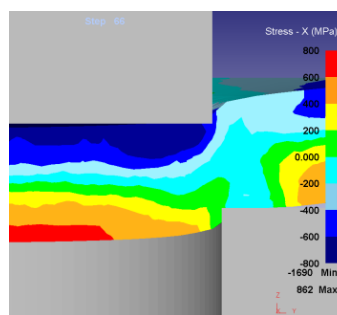
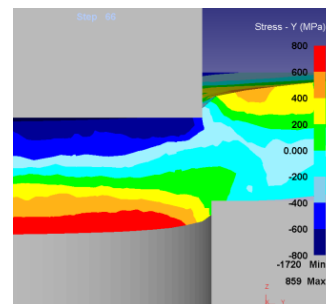


Рис. 6 – Графік технологічного зусилля

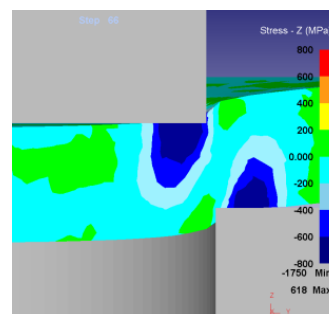
Існує також відмінність визначених компонент напруженого стану за результатами моделювання (рис. 7) та літературними даними [1] (рис. 8).



а



б



в

Рис. 7 – Розподіл напружень в поперечному перерізі заготовки по осях:

а –  $\sigma_x$  окружні; б –  $\sigma_y$  радіальні; в –  $\sigma_z$  вертикальні

Як видно з рисунків схеми напруженого стану в точках 1 і 2, які розташовані на осі деталі та в точці 3 (під ріжучою кромкою пуансона) співпадають: в точці 1 схема напруженого стану близька до

двовісного стиску; в точці 2 – до двовісного розтягу; в точці 3 – всебічний стиск).

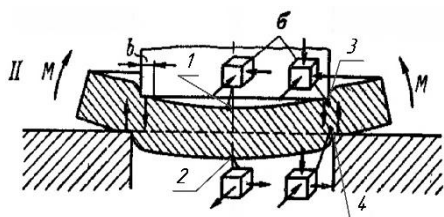


Рис. 8 – Напружений стан в контрольних точках в поперечному перерізі

Для точки 4, що знаходиться біля ріжучої кромки матриці, результати розрахунків відрізняються від даних літературних джерел. І якщо за результатами моделювання в точці 4 по осям X та Y (в окружному та радіальному напрямках відповідно) діють напруження розтягу, а по осі Z (в вертикальному напрямку) – стискаючі напруження, то згідно літературних даних маємо в точці 4 лише одне напруження розтягу по осі Y, два інші напруження – стискаючі.

Така значна кількість невідповідностей викликає сумніви в достовірності отриманих результатів і потребує перевірки за інших параметрів моделювання.

Подальше моделювання процесу вирубання з різними параметрами сітки показало, що найкращі результати досягаються, якщо після перебудови сітки розміри її елементів не змінюються (покращена внутрішня сітка), а поблизу ріжучих кромки інструмента сітка ущільнюється за допомогою вікон щільності.

Результати моделювання процесу вирубання з оптимальними параметрами сітки представлені на (рис. 9–13).

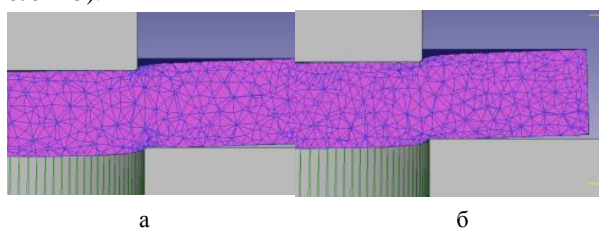


Рис. 9 – Загальний вигляд сітки кінцевих елементів в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

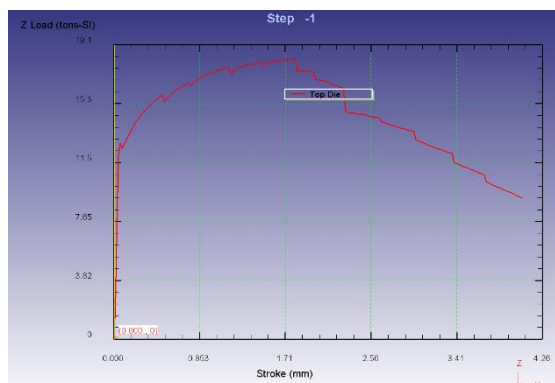


Рис. 10 – Графік технологічного зусилля після зміни параметрів

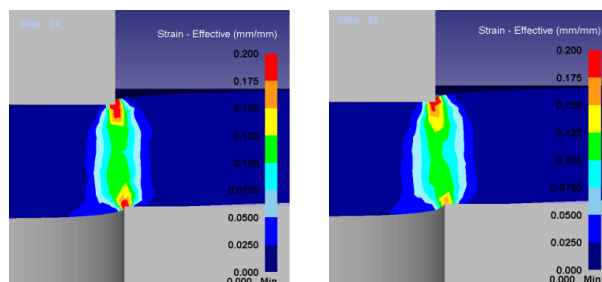


Рис. 11 – Розподіл інтенсивності деформацій в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

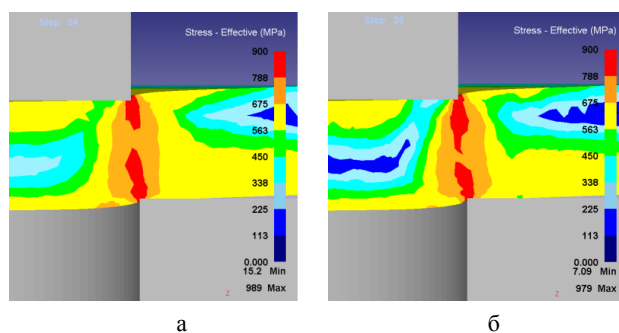


Рис. 12 – Розподіл інтенсивності напружень в поперечному перерізі заготовки:  
а – до перебудови сітки; б – після перебудови сітки

Після зміни параметрів сітки кінцевих елементів розраховане значення критерію руйнування в момент утворення сколюючої тріщини знаходиться в діапазоні 0,38...0,42 (рис. 13).

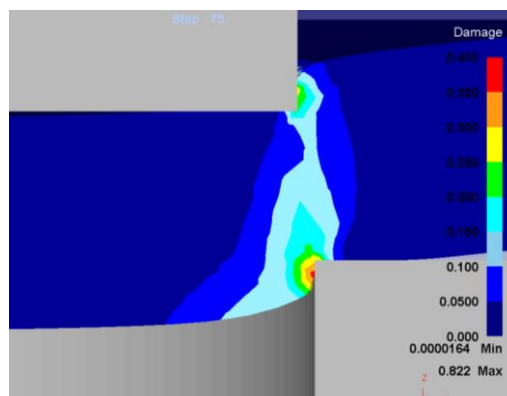


Рис. 13 – Розподіл критерія руйнування в поперечному перерізі заготовки в момент руйнування після зміни параметрів

Також відрізняються від попередніх і результати розрахунку компонент напруженого стану.

Так за результатами моделювання в точці 4 по осям X, Y та Z (в окружному, радіальному та вертикальному напрямках відповідно) діють напруження стиску, але по мірі віддалення від контактної зони в бік центра заготовки відбувається зміна знака напружень і з'являється зона з великими напруженнями розтягу в вертикальному напрямку (рис. 14).

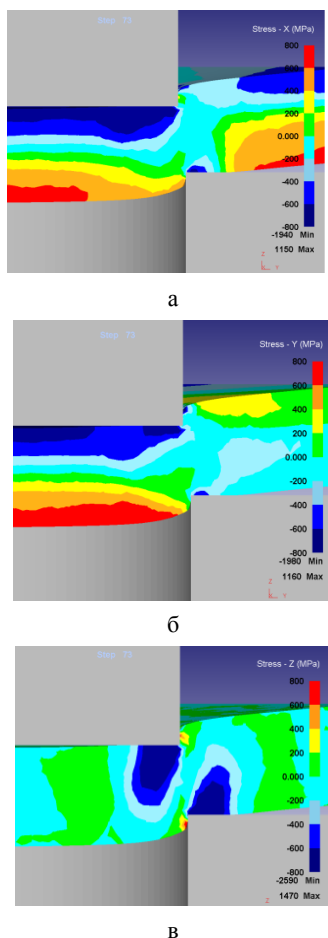


Рис. 14 – Розподіл напружень в поперечному перерізі заготовки по осях:  
а-  $\sigma_x$  окружні; б-  $\sigma_y$  радіальні, в-  $\sigma_z$  вертикальні

Така ж зона з'являється і біля ріжучої кромки пуансона. В цих зонах і мають починатись сколюючі тріщини. Дані результати моделювання не суперечать експериментальним даним [5], коли сколюючі тріщини беруть початок не з ріжучої кромки інструменту, а на певному віддаленні з бічної поверхні деталі (заготовки) (рис. 15).

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження можна стверджувати, що моделювання в програмному середовищі DEFORM 3D може бути використано для аналізу і дослідження процесу вирубування-пробивання. Але при цьому слід враховувати, що на кінцевий результат суттєво впливають параметри сітки кінцевих елементів. Для отримання достовірних результатів сітка має складатись із рівновісних елементів, ущільнених в осередку деформації.

Крім того в процесі дослідження встановлені параметри процесу моделювання, що стосуються

сітки кінцевих елементів, бажано не змінювати, оскільки така зміна може суттєво вплинути на результати моделювання та їх достовірність.

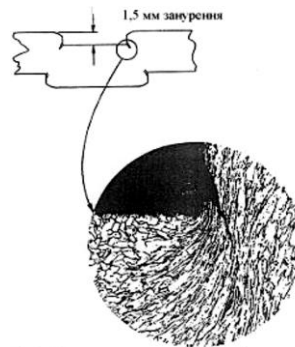


Рис 15 – Момент утворення сколюючої тріщини

**Список літератури:** 1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с. 2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. – 278 с. 3. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.:Машиностроение,1980. – 432 с. 4. Залесский В.И., Губарев В.В. Механизм деформации при резке листового металла в штампах// Технологические процессы обработки стали и сплавов. – 1955. – №61. – С. 409–452. 5. Donald F. Eary, Edward A. Reed. Techniques of Pressworking Sheet Metal (An engineering approach to die design). – Gene: RAL Motors Institute. Industrial Engineering Department, 1976. – pp. 1–19. 6. В.К.Борсевич, В.В.Драгобецкий Анализ разделительных процессов листовой штамповки // КШП, ОМД. – 2009. – № 12. – С. 9–12. 7. Михайленко Ф.П., Антонов Ю.В. Напряженное состояние материала при резке в штампах-// Вестник машиностроения, 1973 8. Liang Xue Ductile Fracture Modeling – Theory, Experimental Investigation and Numerical Verification / Xue. Liang // Massachusetts Institute of Technology. – 2007. – 228 p. 9. Мамутов В.С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых материалов. Журн. «Современное машиностроение. Наука и образование», 2012 – №2, –изд Санкт-Петерб.политех.инст., с.465–471. 10. DEFORM 3D Version 6.1 User's Manual

**Bibliography (transliterated)** 1. Romanovskyy V.P. Spravochnyk po kholodnoy shtampovke. L.: Mashynostroenyie, 1979. – 520 p. 2. Popov E.A. Osnovy teoryi lystovoy shtampovky. Moscow: Mashynostroenyie, 1977. – 278 p. 3. Zubtsov M.E. Lystovaya shtampovka. Leningrad. Mashynostroenyie, 1980. – 432 p. 4. Zaleskyy V.Y., Hubarev V.V. Mekhanyzm deformatsyy pry rezke lystovoho metalla v shtampakh// Tekhnolohycheskye protsessy obrabotky staly y splyavov. – 1955. – No 61. – P.409–452. 5. Donald F. Eary, Edward A. Reed Techniques of Pressworking Sheet Metal (An engineering approach to die design). – Gene: RAL Motors Institute. Industrial Engineering Department, 1976. – pp. 1–19. 6. V.K.Borsevych, V.V.Drahobetskiy. Analiz razdelytel'nykh protsessov lystovoy shtampovky // KShP, OMD. – 2009. – No 12. – P. 9–12. 7. Mykhaylenko F.P., Antonov Yu.V. Napryazhennoe sostoyanye materyala pry rezke v shtampakh.–“Vestnyk mashynostroenyuya”, 1973 Liang Xue. Ductile Fracture Modeling – Theory, Experimental Inverstigation and Numerical Verification / Xue. Liang // Massachusetts Institute of Technology. – 2007. – 228 p. 8. Mamutov V.S. Komp'yuternoe modelyrovanye razrusheniya pry virubke-probyvke osobo tonkolystovykh materyalov. Zhurn. «Sovremennoe mashynostroenyie. Nauka y obrazovanye», 2012, No 2, yzd Sankt-Peterb.polytezh.ynst., – p. 465–471. 9. DEFORM 3D Version 6.1 User's Manual

Надійшла (received) 02.11.2015

Відомості про авторів / About the Authors

**Бень Ігор Володимирович** – аспірант, НТУУ «КПІ», м. Київ, e-mail: 0671253007@ukr.net

**Ben Igor Volodymyrovich** – Ph. D student, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” E-mail: 0671253007@ukr.net

**Орлюк Михайло Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, НТУУ «КПІ», м. Київ, e-mail: minorKhPI@ukr.net

**Orliuk Mikhailo Volodymyrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” E-mail: minorKhPI@ukr.net