

УДК 621.967

В.Л. Калюжний, Д.В. Касян*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВПЛИВУ ОСЬОВОГО ЗАЗОРУ НА НЕПОВНІСТЮ ЗАКРИТЕ ВІДРІЗАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ КРУГЛОГО ПРОКАТУ ЗСУВОМ У ШТАМПІ НА ПРЕСІ**

Показана та описана схема неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі на пресі. Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-3D створені математичні моделі та проведений комп'ютерний аналіз вказаного процесу для отримання заготовок із середньовуглецевої сталі. Використана пластична зі зміцненням модель металу. Встановлений вплив величини осьового зазору між рухомим та нерухомим ножами на енергосилові параметри відрізання, напружений стан в осередку деформації при максимальному зусиллі відрізання та кінцеві напружений та деформований стан в момент відокремлення заготовки від прутка. Визначені залежності зусиль, які виникають на рухомому ножі напрямку переміщення рухомого ножа і в поперечному напрямку, від його переміщення. Приведені розподіли компонент напружень при максимальному значенні зусилля відрізання. Проведена оцінка питомих зусиль на ножах при відрізання. Визначено вплив величини зазору між ножами на напрямку розвитку тріщини у прутку при відрізання. Установлені форми і розміри заготовки після відрізання. По розрахункових даних розроблена конструкція штампа для неповністю закритого відрізання заготовок.

Ключові слова: відрізання заготовок; круглий прокат; метод скінченних елементів; зусилля відрізання; туполучний ніж; напруження; деформації; форма і розміри заготовок.

В.Л. Калюжний, Д.В. Касян**АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ОСЕВОГО ЗАЗОРА НА НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАКРЫТУЮ ОТРЕЗКУ ЗАГОТОВОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОКАТА СДВИГОМ В ШАМПЕ НА ПРЕССЕ**

Показана и описана схема неполностью закрытой отрезки заготовок из круглого проката в штампе на прессе. Методом конечных элементов с использованием программы DEFORM-3D созданы математические модели и проведен компьютерный анализ указанного процесса для получения заготовок из среднеуглеродистой стали. Использована пластическая с упрочнением модель металла. Установлено влияние величины осевого зазора между подвижным и неподвижным ножами на энергосиловые параметры отрезки, напряженное состояние в очаге деформации при максимальном усилии отрезки и конечное напряженное и деформированное состояние в момент отделения заготовки от прутка. Определены зависимости усилий, которые возникают на подвижном ноже в направлении перемещения ножа и в поперечном направлении, от его перемещения. Приведены распределения компонент напряжений при максимальном значении усилия отрезки. Проведена оценка удельных усилий на ножах при отрезке. Определено влияние величины зазора между ножами на направление развития трещины в прутке при отрезке. Установлены формы и размеры заготовок после отрезки. По расчетным данным разработана конструкция штампа для неполностью закрытой отрезки заготовок.

Ключевые слова: отрезка заготовок; круглый прокат; метод конечных элементов; усилия отрезки; напряжения; деформации; форма и размеры заготовок.

V. Kaliuzhnyi, D. Kasian**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE AXIAL GAP ON THE INCOMPLETELY CLOSE CUTTING PROCESS OF A ROUND METAL RODS WITH SHEAR IN PRESS DIE BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

The scheme of incompletely close cutting of round-rolled billets in a press on a press is shown and described. The finite element method using the DEFORM-3D program created a mathematical model and conducted a computer analysis of the process for obtaining billets from medium carbon steel. Used plastic with hardening metal model. The influence of the size of the gap between moving and stationary knives on the energy-power cutoff parameters, the stressed state in the deformation cell and the final deformation state at the time of the workpiece separation from bar are found. The dependences of the cutting forces that arise on the moving knife in the direction of movement of the knife and in the transverse direction, from its movement are established. The distribution of stress components at the maximum value of the cutoff effort is shown. The evaluation of the specific force on the knives in the segment. The influence of the size of the gap between the knives on the direction of crack development in a bars with a piece is determined. The shapes and dimensions of the blanks after cutting are established. According to the calculated data, a stamp design was developed for an incompletely closed cutting of workpiece.

Keywords: cutting of workpiece; round rods; finite element method; cutting force; movable plate cutter; sleeve cutter; stress; strain; blade knife; stress; strain; the shape and size of the workpieces.

Для виготовлення виробів процесами холодного об'ємного штампування в серійному і масовому виробництвах використовують калібровані заготовки, які отримані із сортового прокату відрізанням зсувом в штампах на пресах. Процес відрізання зсувом в штампах на пресах

характеризується високою продуктивністю та являється практично безвідхідним в порівнянні з отриманням заготовок на токарних верстатах. Основи теорії процесів відрізання, рекомендації по конструктивних, енерго-силових режимах та по проектуванню штампового оснащення для різних схем відрізання викладені в джерелі [1]. По останніх даних відрізанням заготовок зсувом в штампах отримують заготовки діаметром до 80 мм [2]. У наведеному джерелі приведені рекомендації по розташуванню прутків відносно напрямку сили відрізання, які дозволяють зменшити енерго-силові режими відрізання. В останній час в області розділення сортового прокату на заготовки відбувається пошук шляхів підвищення точності форми і розмірів отриманих заготовок. В роботах [3-5] показано, що створення додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації при відрізання заготовок дозволяє суттєво підвищити точність форми зовнішньої поверхні та торців відокремленої заготовки. Для цього запропоновані відповідні конструкції штамів. Використання обертально-поступального руху ножів при відрізання також забезпечує підвищення якості отриманих заготовок [6,7]. Покращення якості в напівфабрикатів і виробів в розділових процесах обробки металів тиском, зокрема і при відрізання заготовок із прутків круглого і фасонного перерізу, забезпечується створенням нового спеціалізованого пресового обладнання для вказаних процесів [8,9].

Актуальними задачами для відрізання заготовок із прутків в штампах є подальше доскональне дослідження закономірностей відрізання, силових режимів, питомих зусиль на ножах з урахування комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів, які впливають на цей процес. Такі задачі можна вирішити шляхом комп'ютерного моделювання з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) [10-12]. Особливо це важливо для способу неповністю закритого відрізання, який широко використовують для виробництва мірних вихідних заготовок під подальше холодне об'ємне штампування виробів різноманітної конфігурації.

Метою роботи є використання метода скінченних елементів для встановлення впливу осьового зазору на параметри неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прутка в штампі на пресі шляхом моделювання в програмі DEFORM3D.

Схема на початку процесу неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі та розрахункові схеми зображені на рис. 1. Схема з позначеннями на початку відрізання показана на рис. 1а. Пруток 1 діаметром d подається через втулочний ніж 2 отвір діаметром d_n , який розміщений в корпусі 3. Корпус 3 закріплений на нижній плиті 4 штампа. Переміщення прутка через отвір у рухомому втулочному ножі 5, який встановлений у корпусі 6 та закріплений до верхньої плити 7 штампа, обмежується упором 8. Упор 8 визначає довжину заготовки l , яка відокремлюється від прутка. Ширина обох ножів становить величину b . Між отворами ножів і прутком має місце поперечний зазор z_n для вільного переміщення прутка. Також має місце осьовий зазор z_{oc} між ножами. Зусилля відрізання P_B прикладається за допомогою переміщення рухомого ножа. По такій схемі із прутка діаметром $d=10$ мм із сталі 45 відрізання зі швидкістю $V_0=5$ мм/с та коефіцієнтом тертя між прутком і ножами $\mu=0,12$ відрізання підлягали заготовки з відношенням $l/d=1,5$. Величина поперечного зазору складала $z_n=0,25$ мм, а діаметр отворів ножів відповідно дорівнював $d_n=10,25$ мм при ширині ножів $b=12$ мм. Досліджувався вплив осьових зазорів $z_{oc}=0,10; 0,25$ і $0,50$ мм. На рис. 1б наведена в розрізі в площині xz розрахункова схема на початку відрізання. Пруток 1, який розподілений на скінченні елементи, встановлений в рухомому 2 та нерухомому 3 ножах. Для вибору пресового обладнання зусилля відрізання P_B визначали в напрямку вісі iz , а розпираюче зусилля P_p на ножах для проектування штампового оснащення розраховували в напрямку вісі x . Розрахункова схема при максимальному значенні зусилля відрізання показана на рис. 1в. На цій стадії відрізання на верхній поверхні частини прутка, що відокремлюється, утворюється ум'ятинна від рухомого ножа, а на нижній поверхні має місце утяжина. При цьому, по причині наявності поперечного зазору, має місце нахил прутка і частини, що відокремлюється, на певний кут. Розрахункова схема в момент відокремлення заготовки від прутка приведена на рис. 1г.

Моделюванням встановлені зусилля відрізання, розвиток напружено-деформованого стану в осередку деформації при відрізання та кінцеві форми і розміри отриманих заготовок. На рис. 2 зображені силові режими відрізання з різними величинами осьового зазору z_{oc} . Залежності зусиль відрізання P_B і P_p , які виникають на рухомому ножі від його переміщення наведені на рис. 2а. Для розглянутих величин z_{oc} вказані зусилля зростають до певної величини переміщення рухомого ножа, а потім зменшуються до кінця відрізання. При відрізання із $z_{oc}=0,1$ мм зусилля P_B зусилля P_B досягає максимуму при переміщенні ножа 1,3 мм, а зусилля P_p – при переміщенні 4,8 мм (рис. 2а). Збільшення зазору до $z_{oc}=0,25$ мм приводить до зростання зусилля відрізання P_B та

зменшення розпираючого зусилля P_p на рухомому ножі (рис. 2б). При цьому найбільші значення цих зусиль виникають при переміщеннях приблизно в два рази більших, чим в попередньому випадку.

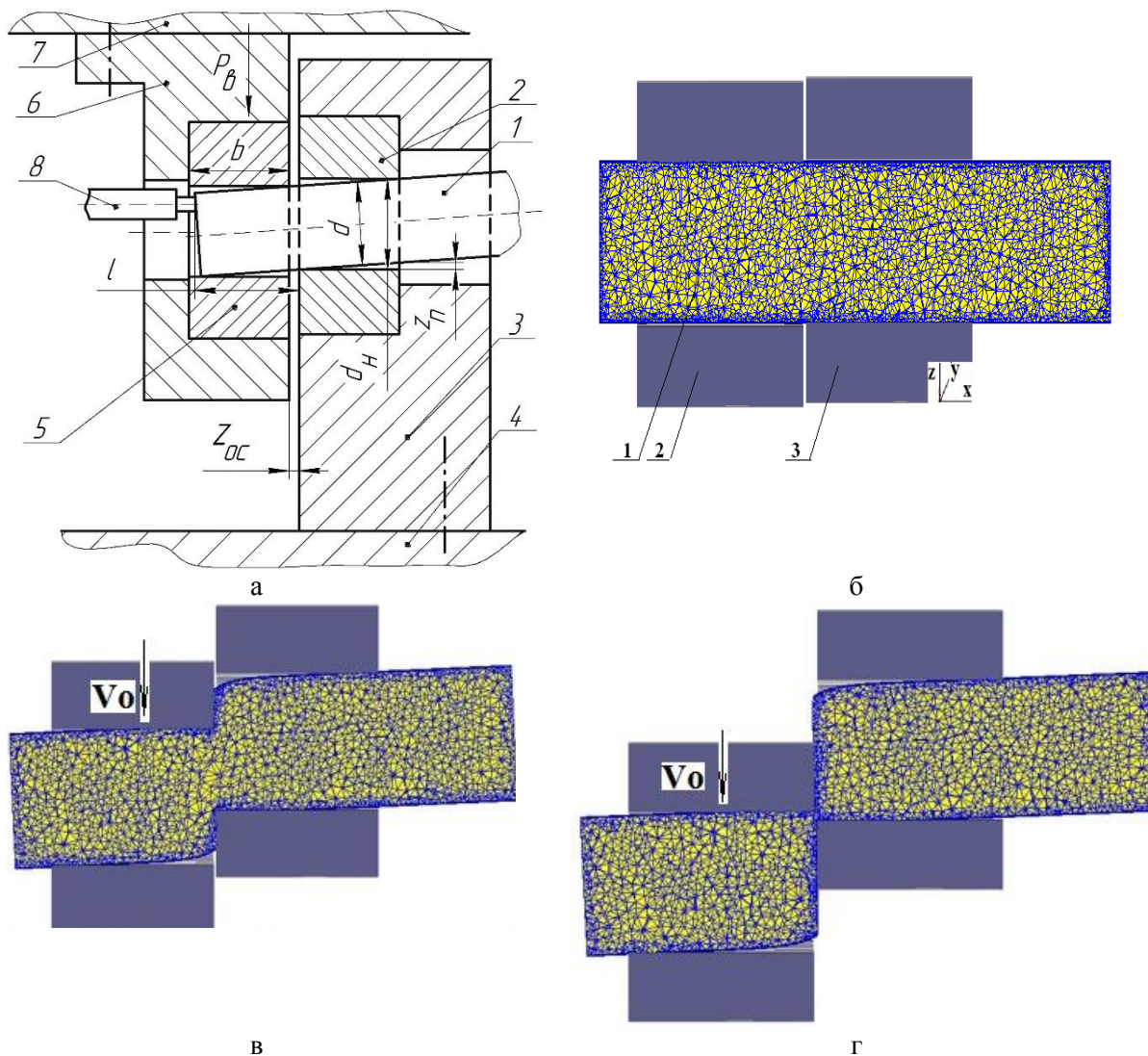


Рис. 1. Схема неповністю закритого відрізання та розрахункові схеми: а – схема на початку неповністю закритого відрізання, б – розрахункова схема на початку відрізання, в – розрахункова схема при максимальному зусиллі відрізання, г – розрахункова схема в момент відокремлення заготовки

Подальше збільшення величини осьового зазору приводить до зменшення величини зусилля P_B та зростання зусилля P_p (рис. 2в). Залежність максимального значення зусилля відрізання P_B від величини осьового зазору z_{oc} приведена на рис. 2г. Крім того варто відмітити що розпираюче зусилля при зазорі $z_{oc} = 0,25$ мм складає приблизно $P_p = 0,25 P_B$, тоді як при двох інших зазорах - $P_p = 0,5 \div 0,6 P_B$.

Для оцінки питомих зусиль на контактуючих поверхнях між ножами і прутком при відрізанні та причини утворення утяжини був визначений напружений стан при максимальних значеннях зусилля відрізання. На рис. 3 наведений розподіл напружень σ_z в перерізі прутка по площині zx для відрізання із зазором $z_{oc} = 0,25$ мм, при якому зусилля відрізання має найбільше значення. На вказаних поверхнях стискаючі напруження σ_z досягають величини -2280 МПа. При таких питомих зусилля для підвищення стійкості ножів їх необхідно виготовляти бандажованими.

Причиною утворення утяжин при неповністю закритому відрізанні являються значні розтягувальні напруження σ_x . Найбільші величини таких напружень виникають при відрізанні із зазором $z_{oc} = 0,5$ мм. На рис. 4 показаний розподіл напружень σ_x при максимальному зусиллі P_B для

$z_{oc} = 0,5$ мм. В нижній області частини прутка, що відокремлюється, має місце зона з розтягувальними напруженнями величиною $\sigma_x = 500$ МПа. Аналогічна зона з такими напруженнями виникає і у верхній частині самого прутка. Тут також утворюється утяжина. Виникнення утяжин разом з ум'ятинами приводить до овальності торців на заготовках.

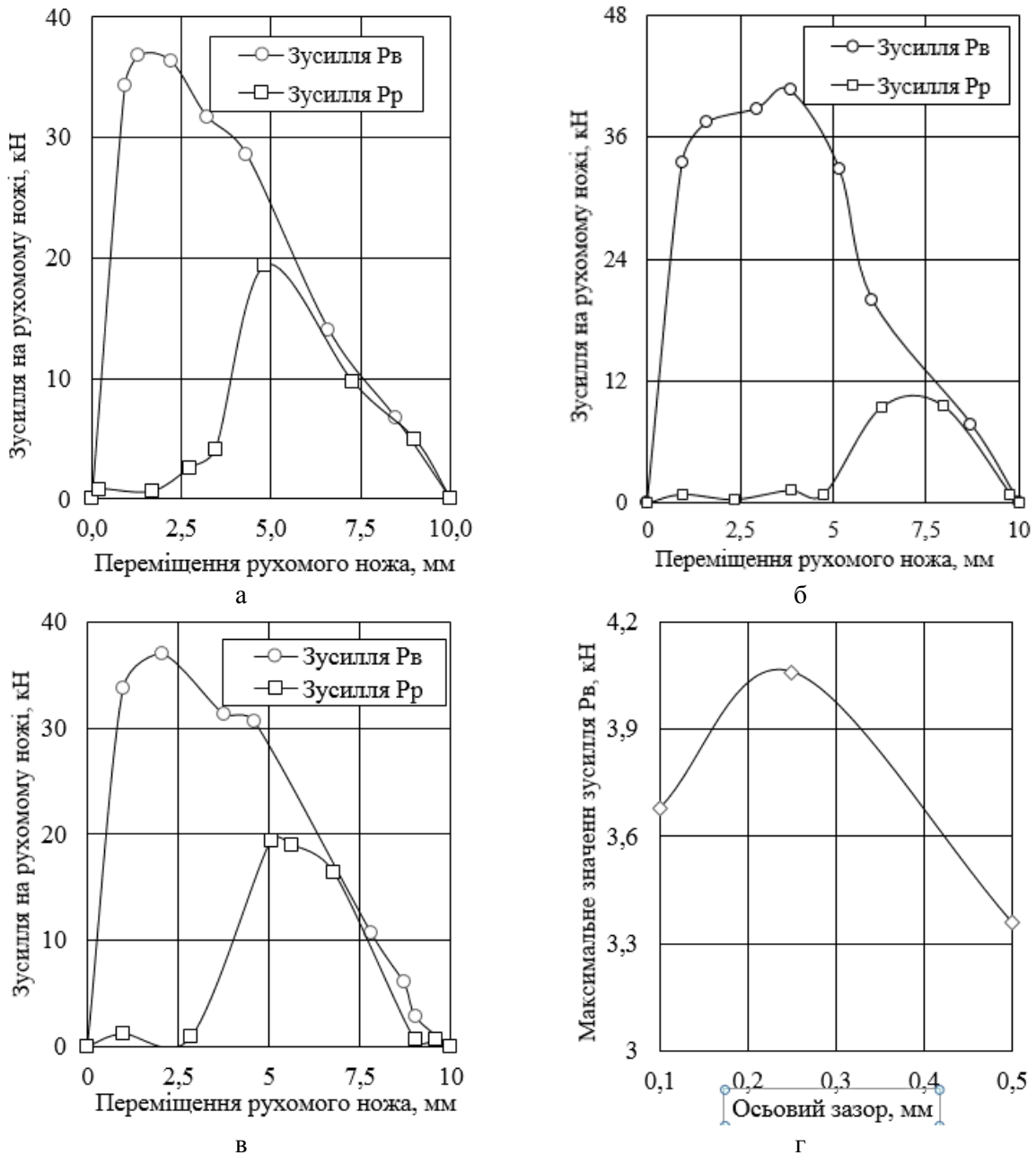


Рис. 2. Силві режими відрізання з різними величинами осьового зазору. Залежності зусиль P_v і P_p від переміщення рухомого ножа: а - $z_{oc} = 0,10$ мм, б - $z_{oc} = 0,25$ мм, в - $z_{oc} = 0,5$ мм, г - залежність величини максимального зусилля P_v від осьового зазору z_{oc}

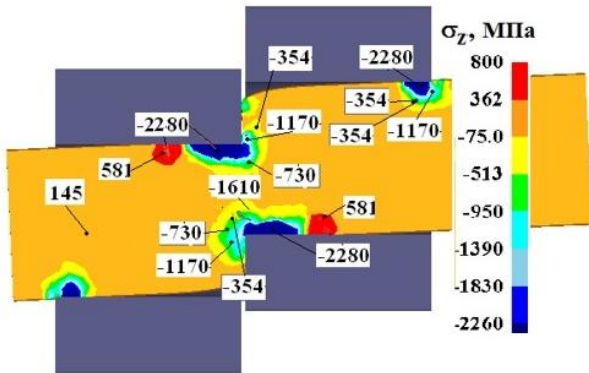


Рис. 3. Розподіл напружень σ_z при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,25$ мм

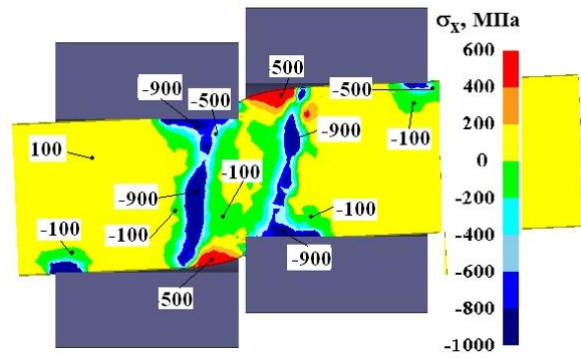


Рис. 4. Розподіл напружень σ_x при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,5$ мм

Напрямок розвитку тріщин від нерухомого до нерухомого ножів та величину осередку деформації при відрізанні можна визначити по розподілу інтенсивності напружень σ_i . На рис. 5 наведений розподіл напружень σ_i при відрізанні із зазором $z_{oc}=0,25$ мм. Області напружень у межах $\sigma_i=809\div 925$ МПа розташовані практично на одній лінії по висоті прутка, тому траєкторії розвитку тріщин співпадають. Осередок деформації у частині прутка, що відокремлюється, та у самому прутку розповсюджується на глибину до 3 мм, що можна визначити по зонам розподілу з величиною $\sigma_i=\sigma_{0,2}=400$ МПа (тут $\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості сталі 45). Розміри осередка деформації зберігаються до кінця відрізання. На рис. 6 приведений розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в момент відокремлення заготовки від прутка при відрізанні із зазором $z_{oc}=0,25$ мм.

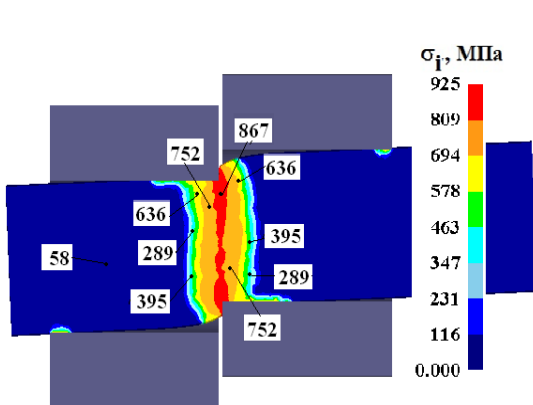


Рис. 5. Розподіл інтенсивності напружень σ_i при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,25$ мм

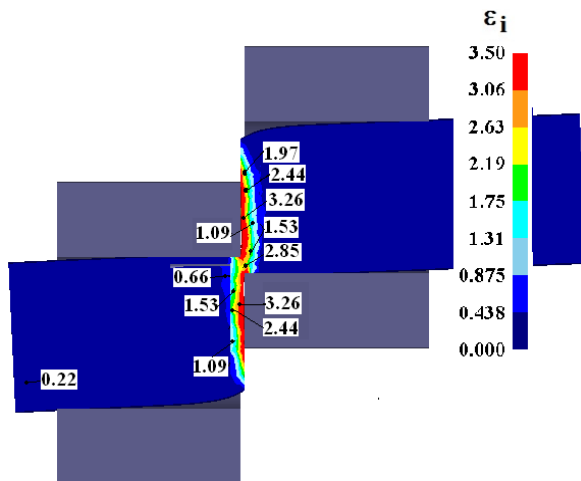
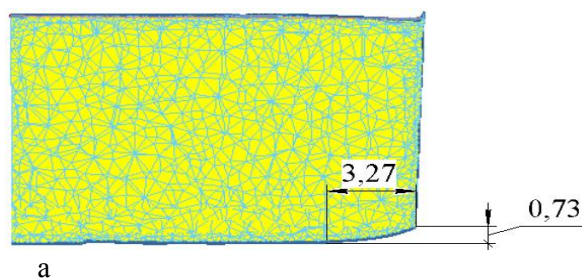
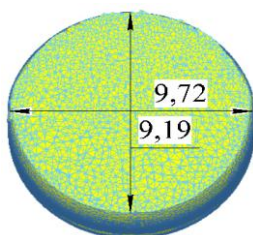


Рис. 6. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в кінці відрізання із $z_{oc}=0,5$ мм

Величина зазору z_{oc} впливає на форму і розміри отриманих заготовок. На рис. 7 наведені форма і розміри заготовок в двох перерізах по місцю відокремлення – по площині z_u та по площині z_x . Збільшення величини зазору приводить до зменшення овальності торів та збільшення утяжини. Після відрізання із $z_{oc}=0,1$ мм довжина утяжини складає 3,27 мм, висота



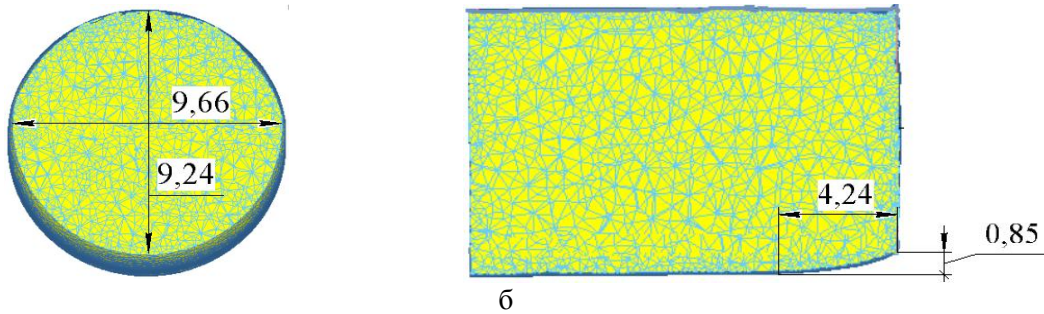


Рис. 7. Форма і розміри заготовок після відрізання: а – із $z_{oc}=0,1$ мм, б - із $z_{oc}=0,5$ мм

0,73 мм, а відношення розмірів овала торця $\delta = 9,72/9,19=1,06$ (рис. 7а). Збільшення зазору до $z_{oc} = 0,5$ мм приводить до зростання ширини і висоти утяжини відповідно до 4,24 мм і 0,85 мм, а відношення розмірів овала зменшується до $\delta = 9,66/9,24=1,04$.

По результатах розрахунків спроектована конструкція загального вигляду штампальця неповністю закритого різання, яка зображена на рис. 8. Нерухомий втулочний ніж 1 встановлений в корпусі 3, який кріпиться за допомогою чотирьох гвинтів 10 до нижньої плити 5 штампальця. В нижню плиту 5 запресована направляюча втулка 8. Аналогічна втулка 9 розміщена в плиті 6, яка за допомогою чотирьох гвинтів 17 прикріплена до корпусу 3. Втулки 8 і 9 служать направляючими для рухомої обойми 7. Обойма 7 представляє собою прямокутну частину з двома циліндричними колонками для направлення в плитах 5 і 6. В прямокутній частині встановлений бандажований рухомий втулочний ніж 2. До обойми 7 за допомогою гвинтів 21 прикріплені два кутники 22. Через отвори у кутниках проходять два гвинти 12, які додатково фіксують плити 5 і 6 між собою. При цьому кутники спираються на дві пружини 13, що призначені для повертання рухомого ножа в вихідне положення після відрізання. Зворотній рух обойми обмежений двома регулювальними гвинтами 11 для забезпечення співпадіння вісей ножів 1 і 2 в вертикальному напрямку. Довжина заготовки, що відрізається визначається рухомим упором 15, який прикріплений до гвинта 23 з гайкою 16, що спирається на пружину 20. Також на гвинт 23 накручується накидна гайка 19. Сам гвинт 23 з упором 15 рухається в корпусі 14, який зафіксований до плити 5 за допомогою гвинтів 10. Гайка 4 і контргайка 15 призначені для регулювання осевого зазору між нерухомим 1 і рухомим 2 ножами. В вихідному стані вісі ножів 1 і 2 співпадають завдяки гвинтам 11 і попереднього стискання пружин 13, що притискають обойму 7 до гвинтів 11. Пруток подається через отвір у гайці 4, нерухомий ніж 1 і рухомий ніж 2 до підпружиненого упору 15, який спрацьовує при натисканні на накидну гайку 19. Після повертання упору назад 15 під дією пружини 13 виконується відрізання шляхом прикладання навантаження від повзуна пресу на обойму 7 та переміщення її вниз. Виштовхування заготовки із рухомого ножа 2 після повертання обойми 7 в вихідне положення виконується наступною подачею прутка.

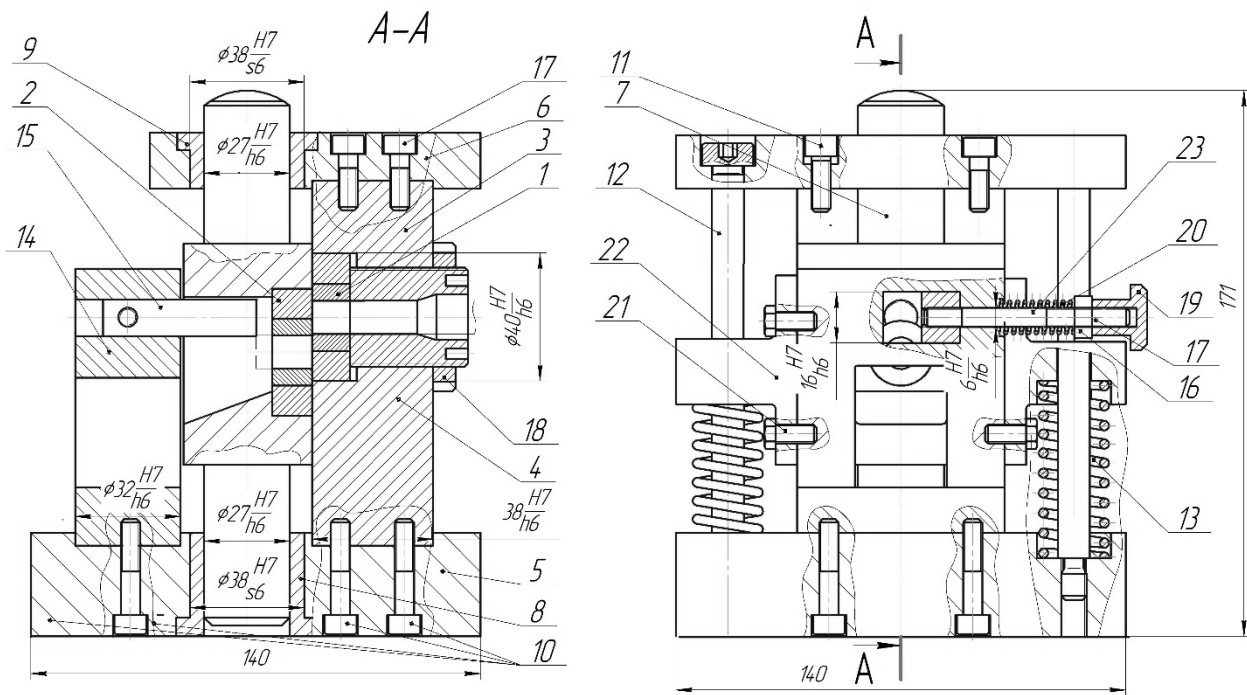


Рис. 8. Конструкція штампу для неповністю закритого відрізання

Висновки. За допомогою МСЕ створені моделі та проведений комп'ютерний аналіз по впливу осевого зазору при неповністю закритому відрізанні на силові режими, напружено-деформований стан в осередку деформації при відрізанні та кінцеві форми і розміри отриманих заготовок. Встановлені величини зусилля відрізання, зусилля розпору ножів при відрізанні. Проведена оцінка питомих зусиль на ножах при максимальному зусиллі відрізання. Показані причини виникнення овальності торців та утворення утяжин на отриманих заготовках. Запропонована конструкція штампу для розділення круглого прокату на заготовки шляхом неповністю закритого відрізання в штампі на пресі.

Список використаних джерел:

1. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов // – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Роганов Л.Л. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №2(23). – С. 131-141.
3. Маркин Н.И. Технологические параметры отрезки коротких точных заготовок в штампах в состоянии всестороннего сжатия / Н.И. Маркин, Э.А. Кравцова, С.А. Москвитин и др. // - Заготовительное производство в машиностроении: Москва, 2010. №6. – С. 21-24.
4. Алифанов А.В. Оптимизация процесса рубки в штампах точных заготовок из прутка / А.В. Алифанов, А.М. Милукова, Л.Л. Сотник // Сб. статей XIII Межд. науч.-практ. конф. «Высокие технологии, экономика, промышленность». Т. 2, Часть 2: Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 18-21.
5. Алифанов А.В. Полузакрытый штамп для рубки сколом высокоточных прутковых заготовок / А.В. Алифанов, Л.Л. Сотник // Весник БарГУ. Серия: Физико-технические науки. – Барановичи: ГУ, 2013, № 1. - С. 38-43.
6. Карнаух С.Г. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката / С.Г. Карнаух, М.А. Винников, Д.С. Карнаух, // - Металлообработка: Санкт-Петербург, 2011, №1(61). – С. 35-41.
7. Диамантопуло К.К. Качество реза и параметры точности заготовок при отрезке в штампах вращающимся инструментом / К.К. Диамантопуло // Известия Московского ГТУ «МАМИ». Т2, 2013. – С. 271-276.
8. Роганов Л.Л. Перспективные направления развития оборудования для безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №3(36). – С. 207-212.

9. Роганов Л.Л. Разработка нового типа кузнечно-штамповочного оборудования для разделительных операций / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // - *Металлообработка*: Санкт-Петербург, 2010. №6(60). – С. 28-34.

10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained stat / J.L.Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // - *Materials Science and Engineering*, 2009, Vol. 499. - Pp. 225-229.

11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // *Materials Transactions.-The Japan Institute of Metals*, 2009. - Vol. 50, No. 7. - Pp. 1671 – 1677.

12. Калюжний В.Л. Аналіз методом скінченних елементів процесу неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату зсувом у штампі на пресі / В.Л. Калюжний, О.С. Ярмоленко // *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудування та металургії», Харків: НТУ «ХП», 2018, № 23 (1306). - С. 28-33.

Рецензенти:

Баглюк Геннадій Анатолійович, д.т.н., с.н.с, заступник директора з наукової роботи ІПМ НАН України;

Гожій Сергій Петрович, д.т.н., доцент, професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»