

Марков О. Є.  
Зінський В. М.  
Ровенський С. Г.  
Молодецький В. В.

## ПРОЕКТУВАННЯ РАДІУСНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ПРОТЯЖКИ ВИСОКИХ ГІЛЬЗ

У роботі досліджено техпроцес протяжки високих гільз через радіусну матрицю. Дослідження спрямовані на вирішення важливої та актуальної науково-технічної задачі удосконалення техпроцесу протяжки через радіусну матрицю з використанням оправки при штампуванні пустотілих поковок типу гільз та високих стаканів. Розроблений спосіб підвищує термін служби матриць для протягування. Методом скінчених елементів (МСЕ) проведено моделювання способу протягування високих гільз через радіусну матрицю з різними радіусами заокруглення. За результатами моделювання було розроблено оптимальну форму та розміри радіусної матриці для протягування. Встановлено рекомендації щодо розробки радіусних матриць. Ці рекомендації полягають у призначенні оптимального радіусу робочої поверхні протяжної матриці. Отримані рекомендації були експериментально перевірені у виробничих умовах. Було встановлено, що протяжку високих гільз через матрицю слід проводити за відносного радіусу робочої поверхні матриці  $R/d = 3$ . У результаті досліджень інтенсивність напружень та середні напруження на робочій поверхні матриці були знижені на 8...15 %, а нормальні тиски були знижені на 10...15 %. Сумарна сила та радіальна компонента цієї сили були знижені до 50 %. За результатами дослідження було визначено, що поверхня матриці нагрівається до 700...800 °C, причому радіус  $R/d = 3$  знижує розміри цієї зони в 1,5... 2,0 рази. Перевірка отриманих результатів проводилася у промислових умовах. Встановлено, що сила протяжки для радіусу  $R/d = 3$  нижче 20 %, а стійкість матриці зростає на 20 %. Таким чином, рекомендовано застосовувати радіусні матриці з  $R/d = 3$  для протягування гільз.

**Ключові слова:** протяжка, матриця, оправка, гільза, робоча зона, зношування, стійкість матриці, пустотіла заготовка, МСЕ.

Серед поковок відповідального призначення особливе місце посідають високі гільзи. З них виготовляють такі деталі як балони, снаряди, корпуси гідро- та пневмоциліндрів та ін. Це, як правило, серійне виробництво, яке становить сотні тисяч деталей на рік. Слабкими місцями такого виробництва є значні припуски на механічну обробку, низька стійкість протяжних матриць та застосування спеціалізованих гідравлічних швидкісних пресів з великим ходом. Основною формоутворюючою операцією для цих поковок є протяжка товстостінного стакану через матрицю із застосуванням внутрішньої оправки. Матриці можуть мати конусну чи радіусну робочу частину. Матриці з конусною робочою поверхнею загальновідомі. Матриці з робочою поверхнею, яку виконано по радіусній кривій, малодосліджені. Така геометрія матриці має дозволити підвищити стійкість протяжних матриць. Тому удосконалення процесу протягування за рахунок застосування матриць спеціальної форми є актуальною проблемою.

У сучасній літературі мало інформації щодо операції протягування на оправці через матриці, проте проблема стійкості матриць та штампів при гарячому деформуванні залишається актуальним питанням [1, 2].

У роботі [3] було проведено експеримент із штампування корпусу снаряда на гідравлічному пресі. Штампований снаряд має бажану мікроструктуру та гарні комбіновані механічні властивості з економією металу 30 %. Однак не розглянуто питання підвищення стійкості протяжних матриць, як навантажений інструмент. Причиною цього може бути виняток варіанта зміни робочої геометрії матриці.

Метою статті [4] є надання нової точки зору на види руйнування матриць, такі як знос (абразивний та адгезійний), пластична деформація, втома (термічна та механічна). Ці проблеми виникають через високі термічні дії, механічні напруження і корозію під час гарячого штампування. А також вплив сил тертя, що виникають під час радіального видавлювання [5]. При цьому підвищення ресурсу матриць розглядається лише за рахунок застосування спеціальних сплавів. Це є результатом впливу реактивних сил тертя, які можуть розвантажувати процес деформування.

У статті [6] досліджується застосування покриття вставки штампу для гарячого штампування на молоті у реальних промислових умовах. Оптимізовано конструкцію форми вставки штампу для зниження критичного навантаження, яке викликає передчасне пошкодження, у поєднанні з удосконаленим процесом плазмового азотування це потрібно для продовження терміну служби вставки штампу. Однак запропоновані рекомендації відносяться до молотових штампів, які менш навантажені, але для протяжних матриць вони не підходять.

У роботі [7] розроблено скінчено-елементну модель для вивчення термомеханічної втомної поведінки сталі для гарячої обробки. Були використані експериментальні результати за втомними властивостями сталі 9Cr. Потім виконано моделювання термомеханічної втоми для штампу гарячого кування з прогнозуванням виникнення та зростання втомної тріщини. При цьому в розробленій моделі не враховано абразивне та адгезійне зношування робочої поверхні матриці.

У роботі [8] композит на основі TiB<sub>2</sub>·TiAl<sub>3</sub>/2024Al було піддано різноспрямованому куванню, також було досліджено вплив температури та кількості проходів кування на мікроструктуру та механічні властивості композиту. Поліпшення міцності, викликане такою обробкою досліджуваного композиту, було кількісно проаналізовано з допомогою моделей механізму зміцнення. Однак у роботі було встановлено, що розрахункові результати показали, що навантаження та теплове розширення призводять до зниження міцності за рахунок збільшення розмірів зерна. Тому завдання не було вирішено повністю.

Авторами роботи [9] було розроблено алгоритм оптимізації для отримання оптимального параметра, який враховує температуру заготовки та швидкість деформування в процесі штампування. При цьому в роботі зазначено, що результати експерименту показують, що алгоритм не виключав нестабільні області. Тому отримані результати ще слід перевіряти додатково.

У роботі [10] розглядаються можливості застосування різних методів підвищення стійкості штампового інструменту. Також представлено використання систем контролю та вимірювання, які дозволяють здійснювати повний контроль процесу штампування, та застосування інноваційних рішень, що дозволяє ефективно підвищувати ресурс стійкості штампової оснастки [11]. Однак у роботах показано, що застосуванням ряду методів на основі автоматизованих засобів не завжди можна вирішити проблеми, пов'язані з коротким терміном служби інструменту. Тому дані розробки слід уточнювати та розширювати у напрямку підвищення стійкості матриць.

У статті [12] показано можливості застосування сучасних методів вимірювання в штампувальній промисловості з використанням різних вимірювальних інструментів, приладів і машин, що застосовуються у цеховій метрології. Робота вказує на різні аспекти методів вимірювання, підкреслюючи їх важливість у контексті безпеки (отримані поковки-вироби) та суттєві проблеми вимірювання через екстремальні умови у промислових процесах гарячого кування (високі циклічні механічні навантаження та температури). Проте, представлені додатки результатів чисельного моделювання визначення фізичних величин, важко, а часом неможливо перевірити у промислових умовах (розподіли температур, напружень, деформації тощо). Що вимагає зміни підходу у питанні підвищення стійкості деформуючого оснащення [13–15].

Мета роботи – дослідження та розробка нової геометрії радіусної матриці для протягування високих гільз на основі кількісної оцінки напруженого, силового та теплового стану, що дасть змогу підвищити їхню стійкість при серійному виробництві.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- визначити напружений стан на робочій поверхні радіусної матриці з різними радіусами заокруглення (інтенсивність напружень, середні стискаючі напруження, нормальний тиск, результуюча сила, її радіальна компонента, тепловий стан, а також силові параметри процесу);
- перевірити встановлену нову геометрію матриці експериментально.

Об'єктом дослідження є технологічний процес протягування на оправці товстостінних стаканів через радіусну матрицю (рис. 1, а).

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що протяжка стаканів через радіусну матрицю (рис. 1 б) дозволить підвищити стійкість матриці за рахунок зміни напружено-деформованого стану в металі заготовки, що дозволить знизити витрати на виробництво протяжних матриць.

Основним припущенням дослідження є сталість швидкості прошивання порожнистої заготовки через матрицю.

На першому етапі для оцінки навантажень на інструмент встановлювався вплив напруженого стану на робочій поверхні матриці, потім сили та тиску деформування, а також тепловий стан матриці в процесі протяжки. За результатами цього дослідження визначено раціональну геометрію радіусної робочої поверхні, яка знижуватиме навантаження на матрицю.

Дослідження процесу протяжки проводилося для різних відносних радіусів округлення робочої частини матриці ( $R/d$ ) у такому порядку: 0,75; 1,0 та 3,0. Товщина стінки стакану була для всіх випадків стала, діаметр отвору матриці також був постійним, щоб забезпечити однаковий ступінь деформації (коефіцієнт витяжки). Напружений, силовий та тепловий стан у процесі гарячої протяжки через матрицю (рис. 1) було встановлено з використанням МСЕ. Для моделювання процесу протяжки було розроблено спеціальну методику проведення досліджень. Як досліджуваний матеріал була призначена сталь С-60.

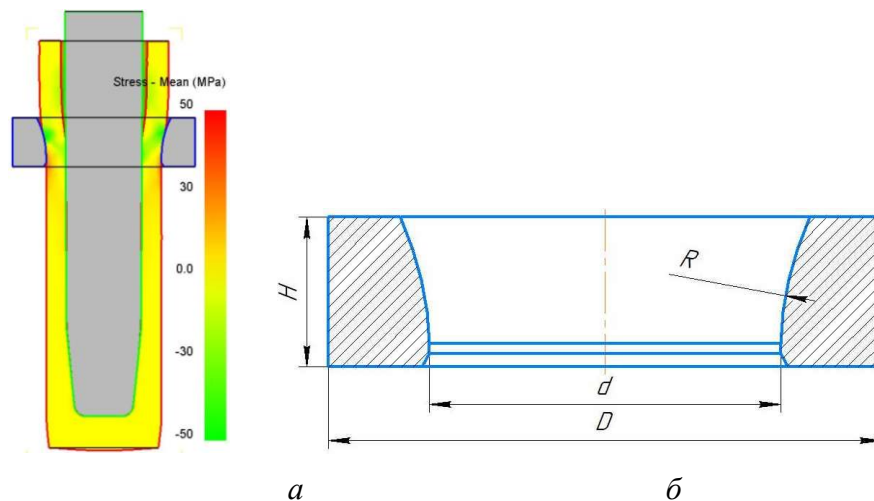


Рис. 1. Моделювання нового процесу протяжки:  
а – розрахункова схема; б – ескіз радіусної матриці

Вихідними параметрами та граничними умовами для моделювання гарячої протяжки через матрицю: модуль Юнга для цієї сталі становив  $2 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона 0,32, температура інструменту –  $300$  °С, коефіцієнт тертя по Зібелю 0,3. Кількість кінцевих елементів задавалася в заготовці становила 40000, а матриці – 32000. Модель матеріалу заготовки – пластична, а матриці – пружна. Температура нагрівання заготовки  $1100$  °С, швидкість руху оправки 60мм/с. Марка матеріалу матриці 4Х5МФС.

Стійкість матриці можна оцінити напруженим станом матриці. Найпростішим показником напруженого стану є інтенсивність напружень на робочій поверхні (рис. 2). Аналіз одержаних результатів дозволив встановити таке. Малі радіуси заокруглення західної частини матриці ( $R/d = 0,75$ ) призводить до локалізації максимальних напружень (на рис. 2 показані блакитним кольором) на криволінійній частині (рис. 2, а). Для такої геометрії рівень напружень становить 523 МПа. Така локалізація напружень призводить до підвищення зносу саме у цій зоні.

Збільшення радіуса заокруглення матриці до  $R/d = 1,0$  змінює форму та розміри поля інтенсивностей напружень (рис. 2, б). Поле напружень опускається і починає навантажувати калібруючий поясок матриці. Рівень напружень підвищується до 578 МПа. Отже, такий радіус заокруглення буде підвищувати знос матриці. Збільшення радіуса заокруглення матриці до  $R/d = 3,0$  змінює форму поля напружень, яке продовжує опускатися вниз до опорної поверхні матриці (рис. 2, в). Однак рівень інтенсивності напружень знижується і максимум їх становить

489 МПа. Остаточний висновок про вплив полів інтенсивності напружень на знос робочої поверхні матриці зробити складно. Для цього потрібно визначити знак напружень на контактній поверхні.

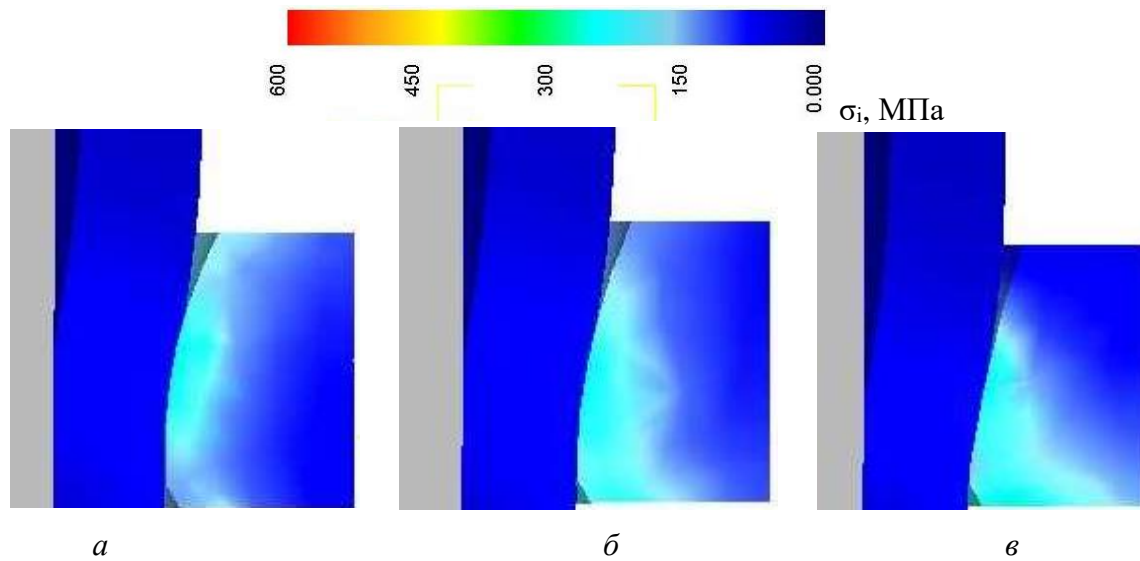


Рис. 2. Інтенсивність напружень ( $\sigma_i$ , МПа) в заготовці та інструменті в процесі протяжки:  
 $a - R/d = 0,75$ ;  $b - R/d = 1,0$ ;  $v - R/d = 3,0$

На знос матриць впливають контактні напруження та тиск на інструмент. Щодо напружень, то слід враховувати їх знак: вони стискають або розтягують. Стискаючі напруження на поверхні сприятимуть зносу робочої поверхні матриці. Тому на другому етапі необхідно визначити, які напруження діють з боку заготовки на робочу поверхню матриці, їх рівень і знак цих напружень. Стискаючі напруження мають знак «мінус». Переважний знак напруження можна встановити за розподілом середніх напружень. Вони показують рівень і знак переважаючих напружень. Розподіл середнього напруження в заготовці та інструменті представлено на рис. 3.

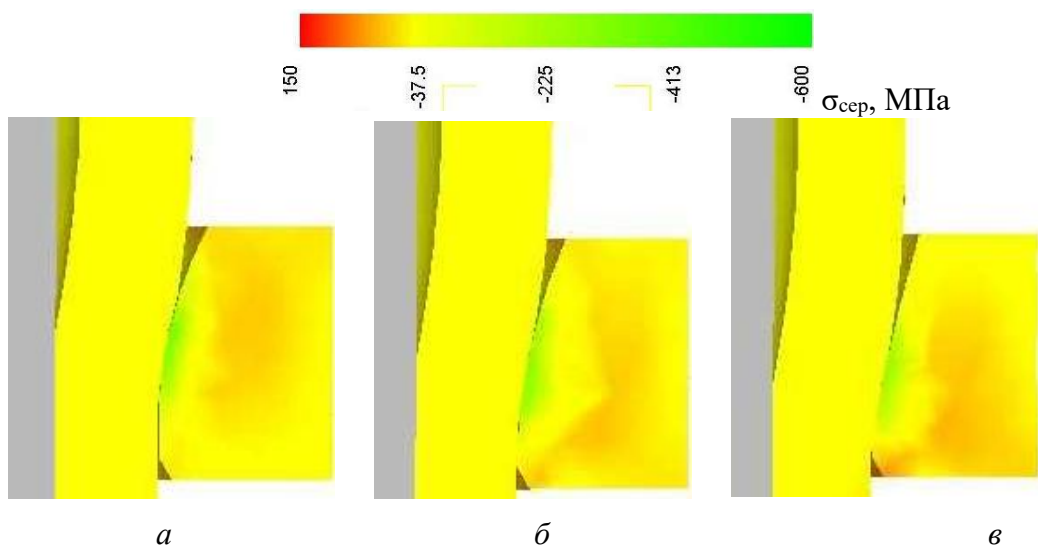


Рис. 3. Розподіл середніх напружень ( $\sigma_{сеп}$ , МПа) в заготовці та інструменті в процесі протяжки:

$a - R/d = 0,75$ ;  $b - R/d = 1,0$ ;  $v - R/d = 3,0$

Аналіз полів стискаючих напружень (на рис. 3 показані зеленим кольором) показує наступне. Розміри зони та форма поля максимальних стискаючих напружень для досліджуваних

схем різна. Для малого радіусу західної частини ( $R/d = 0,75$ ) поле максимальних стискаючих напружень розташовується вище калібруючого пояска матриці (рис. 3, *a*), їх величина досягає – 648 МПа. Між зовнішньою поверхнею заготовки і калібрувальним пояском матриці утворюється незначний зазор. Це пояснює розвантаження калібруючого пояска, а відповідно призводить до інтенсивного навантаження і відповідно підвищеного зносу робочої поверхні матриці.

Збільшення радіуса заокруглення до  $R/d = 1,0$  (рис. 3, *б*) західної частини протяжної матриці призводить до підвищення рівня стискаючих напружень (–689 МПа). При цьому висота поля стискаючих напружень більша, ніж для попередньої схеми. Подальше збільшення радіуса заокруглення західної частини матриці до  $R/d = 3,0$  (рис. 3, *в*) якісно та кількісно змінює розподіл середніх напружень на робочій поверхні. А саме, площа поля напружень зменшується, а також знижується рівень стискаючих напружень (–601 МПа). Це дозволяє зробити висновок, що такі радіуси заокруглення матриці ефективніші і можуть підвищити стійкість матриці.

Альтернативним показником навантажень на робочу поверхню матриці є результуюча сила впливу від металу заготовки в процесі протяжки (рис. 4). Зона докладання сили збігається з областями виникнення максимальних напружень (див. рисунки вище). Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок, що зі збільшенням радіуса заокруглення результуюча сила на робочу поверхню матриці знижується. Так, для малого радіуса  $R/d = 0,75$  максимальні сили впливу становлять 14–18 кН; для радіусу  $R/d = 1,0$  становлять 12–16 кН; для радіусу  $R/d = 3,0$  становлять 9–13 кН. Площа докладання сил відповідає площі контакту заготовки з матрицею і для схем, що розглядаються, приблизно однакова.

Розподіл радіальних компонент сил на матрицю представлено на рис. 5. Максимальна сила, що діє на робочу поверхню матриці на рисунку 5, показана жовтим кольором. Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок, що зі збільшенням радіуса заокруглення радіальна сила, що діє на робочу поверхню матриці, знижується. Зокрема, для радіусу  $R/d = 0,75$  максимальні радіальні сили становлять 6...12 кН; для радіусу  $R/d = 1,0$  становлять 5...10 кН; для радіусу  $R/d = 3,0$  становлять 4...8 кН.

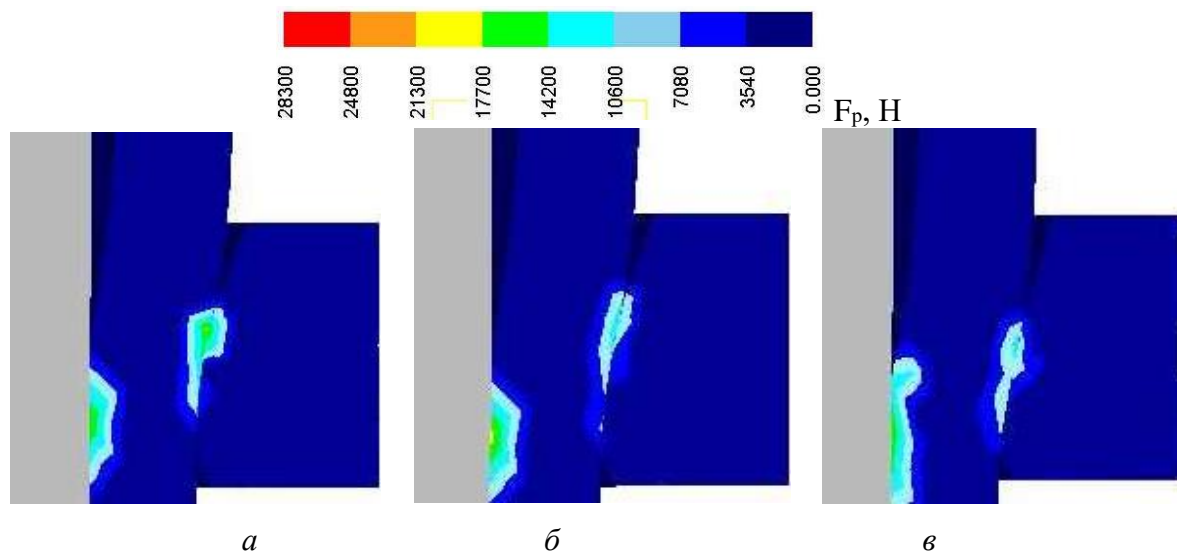


Рис. 4. Розподіл результуючої сили впливу ( $F_p$ , Н) заготовки на інструмент у процесі протягування:

*a* –  $R/d = 0,75$ ; *б* –  $R/d = 1,0$ ; *в* –  $R/d = 3,0$

Щоб уникнути абсолютних розмірів матриць і перейти до відносних, були розглянуті поля розподілу нормальних тисків металу заготовки на матрицю (рис. 6). Аналіз отриманих результатів дозволив дійти такого висновку, що мінімальний нормальний тиск виникає при радіусі  $R/d = 3,0$  і становить 1240 МПа (рис. 6, *в*). За інших випадків значення тиску на 10...15 % вище.

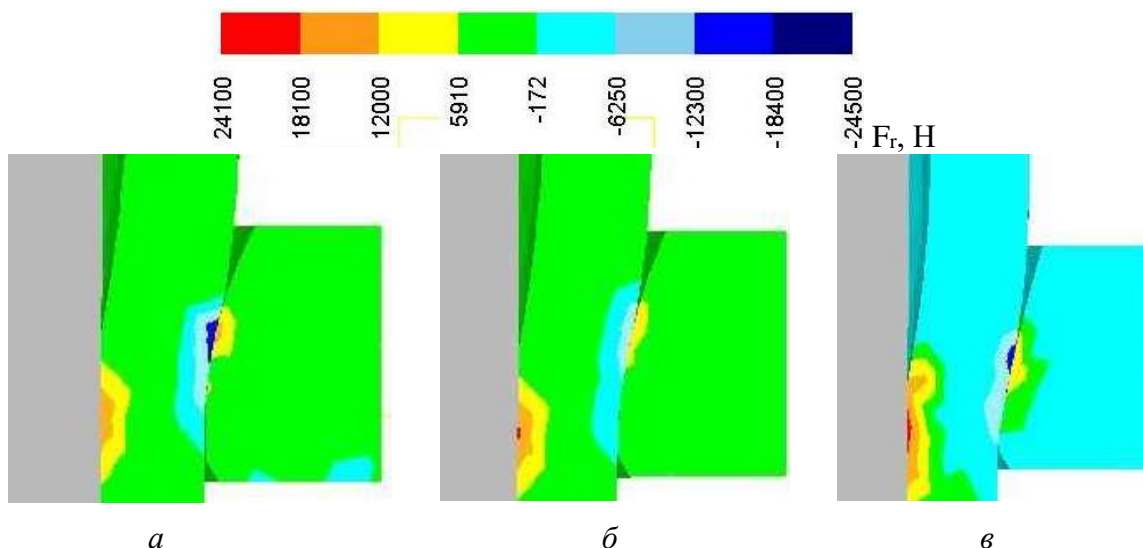


Рис. 5. Радіальна компонента сили впливу ( $F_r, H$ ) заготовки на інструмент у процесі протягування:

*a* –  $R/d = 0,75$ ; *б* –  $R/d = 1,0$ ; *в* –  $R/d = 3,0$

Важливе значення на стійкість матриці має температура. Аналіз результатів розподілу температури показав, що робоча поверхня матриці розігрівається мінімально для великих радіусів заокруглення (рис. 7, *в*). В цьому випадку і менша зона розігріву. Це зменшує площу контакту металу заготовки з матрицею за допомогою меншої довжини дуги робочої зони матриці. Максимальна температура прогріву матриці становить 750...850 °С, але розміри зони (об'єг) такого прогріву різні. Так для великих радіусів заокруглення об'єм прогріву до цих температур практично в 1.5...1.9 разів менше.

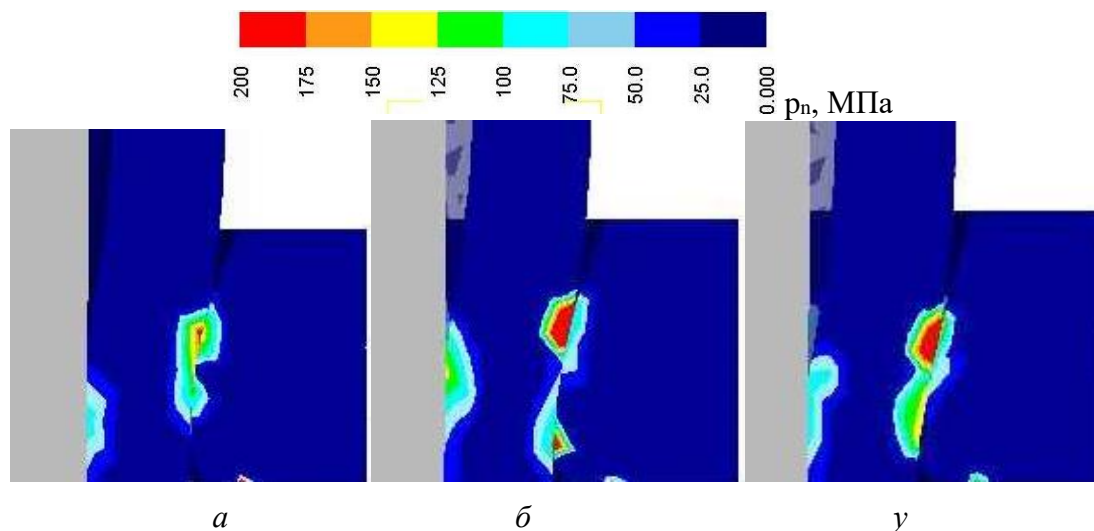


Рис. 6. Розподіл нормальних тисків ( $p_n, \text{MPa}$ ) заготовки на інструмент у процесі протяжки: *a* –  $R/d = 0,75$ ; *б* –  $R/d = 1,0$ ; *в* –  $R/d = 3,0$

Непрямим показником підвищення стійкості матриці є зниження сили деформування у процесі протяжки. Для цього було побудовано графік (рис. 8) зміни сили у процесі деформування для трьох різних геометрій матриць ( $R/d = 0,75$ ;  $R/d = 1,0$ ;  $R/d = 3,0$ ). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що мінімальна сила протяжки на основному етапі деформування (стадія, що встановилася) була мінімальна для радіуса округлення  $R/d = 3,0$  і становила приблизно 330 МН.



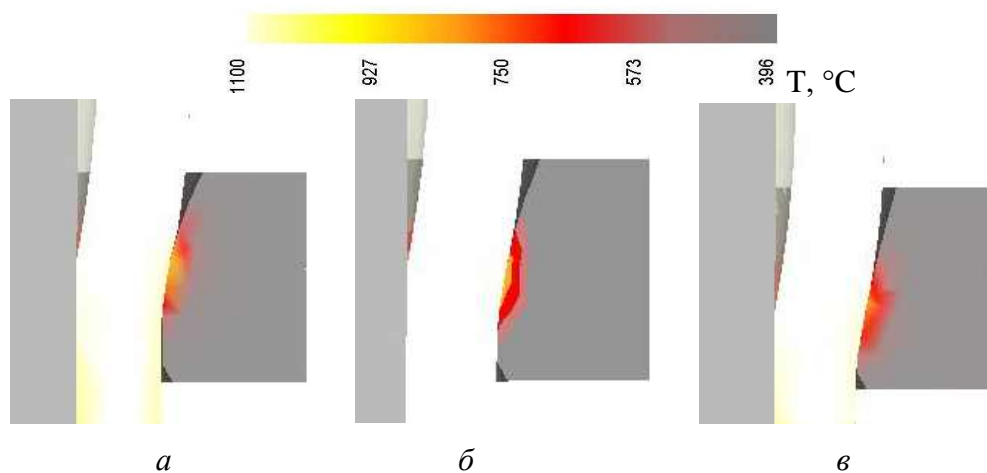


Рис. 7. Розподіл температур ( $T$ , °C) у заготовки та інструменті в процесі протягування: а –  $R/d = 0,75$ ; б –  $R/d = 1,0$ ; в –  $R/d = 3,0$

Мінімальна сила деформування для відносного радіуса заокруглення матриці  $R/d = 3,0$  пояснюється низькими тисками та напруженнями, що діють на матрицю для цієї геометрії (див. рис. 3–7).

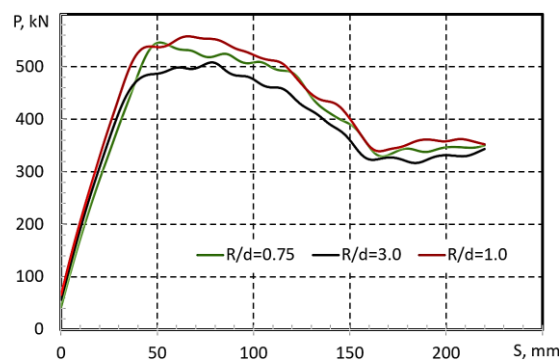


Рис. 8. Сила деформування ( $P$ , кН) в процесі протяжки для різних радіусів заокруглення матриці ( $R/d = 0,75$ ;  $R/d = 1,0$ ;  $R/d = 3,0$ )

Результати теоретичного дослідження показали, що мінімальні навантаження на матрицю відбуваються при протягуванні через матрицю з відносним радіусом  $R/d = 3,0$ . Для цієї геометрії було спроектовано та виготовлено матрицю зі сталі 4X5МФС. Діаметр отвору матриці ( $d$ ) становив 164 мм, радіус заокруглення робочої поверхні матриці ( $R$ ) був 492 мм. Матриця встановлювалася на гідравлічний прес із великим ходом силою 600 МН. Процес протягування здійснювався в гарячому стані з температурою приблизно 1000 °C, із застосуванням масло-графітового мастила, яке подавалося безпосередньо в робочу зону матриці. Матриця та оправка охолоджувалися проточною водою. Пікова сила протягування становила 480 МН, основна робоча сила близько 300 МН. Після гарячого протягування через цю матрицю 2200 поковок матриця отримала помітні сліди зносу (рис. 9). Інтенсивне зношування відбулося в місці виникнення максимальних напружень і тиску від заготовки на робочу поверхню матриці. Калібруючий поясок має неглибокі подряпини, які були викликані впливом окалини, яка залишалася на поверхні заготовки. Робоча поверхня матриці має сильний локальний знос, який може бути виправлений наплавленням і шліфуванням. Після протягування поковка охолоджувалася на повітрі.

Таким чином, отримані експериментальні результати збігаються і підтверджують теоретичне дослідження МСЕ. Встановлено, що великі радіуси заокруглення робочої поверхні знижують навантаження на робочу поверхню матриці та сприяють підвищенню стійкості матриці загалом. Після зміни внутрішньої геометрії матриці стійкість підвищилася на 20 %.

За результатами проведеного теоретичного дослідження було встановлено, що малі радіуси округлення робочої поверхні матриці призводять до виникнення високих напружень і тисків на робочу поверхню з боку гарячої заготовки (див. рис. 2, 3 і 6). Це можна пояснити тим, що при малих радіусах заокруглення дуга, що утворюється, має велику стрілу прогину, що підвищує опір течії металу в отвір матриці (див. рис. 8). Це призводить до підвищення енергетичних витрат (зростає сила деформування), які відповідно впливають через контактні напруження та тиск на робочу поверхню матриці (див. рис. 8). У цьому випадку слід застосувати відносні радіуси заокруглення  $R/d > 3,0$ .

Інтенсивністю напружень не вдалося повно оцінити напружений стан на робочій поверхні матриці (див. рис. 2), це можна пояснити тим, що цей параметр є середньоінтегральною величиною. Збільшення радіуса заокруглення дозволило знизити інтенсивність напружень на 7...17 %, а дослідження полів середніх напружень дозволило визначити напруження, що стискають і їх рівень (див. рис. 2 та 3). Це пояснюється тим, що при малих радіусах заокруглення робочої поверхні матриці, пляма контакту металу заготовки з матрицею має меншу площу, проте в цьому місці локалізуються значні стискаючі напруження і вони розташовуються помітно вище калібруючого пояса матриці (див. рис. 3). Це розвантажує поясок від інтенсивних напружень, більше того, у цьому випадку відбувається протяжка з утворенням зазору в цій зоні.



Рис. 9. Матриця після протягування для радіуса заокруглення  $R/d = 3,0$

Розкладання напружень на сили, що діють на робочу поверхню матриці, дозволило встановити, що розподіл полів напружень збігається з полями виникнення максимальних сил (див. рис. 4). Величина цих сил знижується зі збільшенням радіуса заокруглення  $R$ . При радіусі заокруглення  $R/d = 3,0$  результуюча сила знижується на 40...55 %. Це пояснюється тим, що виділена радіальна компонента відображає зниження сили (див. рис. 8) при збільшенні радіуса заокруглення, а також наближенню осередка максимальних сил до пояса, що калібрує (див. рис. 3). Збільшення радіуса заокруглення дозволило знизити радіальну компоненту сили до 50 % (див. рис. 5). Те саме стосується і нормальних тисків, які дозволили врахувати ще й площу дії контактних сил (див. рис. 6). Збільшення радіуса заокруглення дозволяє знизити нормальний тиск на 10...15 %. Ці результати пояснюються тим, що при великих радіусах заокруглення довжина дуги зменшується, а відповідно зменшується площа дії сил тертя (див. рис. 5).

Для комплексної оцінки стійкості матриці слід зважати на температуру навантаженої зони матриці. Зона розігріву та зона локалізації сил та напружень збігаються. Це призведе до того, що в цій зоні буде максимальне зношування матриці. Максимальна температура розігріву навантаженої частини матриці становить близько 750...850 °C (див. рис. 7) і перевищує теплостійкість матричної сталі 4X5МФС, це призведе до зниження стійкості матриці. Однак для великих радіусів заокруглення обсяг цієї розігрітої зони буде меншим у 1.5...1.9 разів. Це пояснюється меншою площею контакту і відповідно меншою площею поглинання тепла матрицею від заготовки (див. рис. 7).

Зі встановленими вище результатами корелюють дані сили протяжки через різні матриці. Так щодо відносного радіуса округлення матриці  $R/d = 3,0$  сила протяжки буде нижче 10...15 %, ніж меншого радіуса округлення. Експериментальні дослідження розробленої нової геометрії підтверджують результати моделювання МСЕ. Розташування зони зносу матриці збігається з навантаженими контактними напруженнями та зонами тиску. Сила протяжки була



знижена на 15–20 %, а стійкість матриці підвищилася на 20 %. Це пояснюється зниженням сил тертя при протяжці з великими радіусами заокруглення матриці (рис. 8).

На відміну від досліджень [5], в яких розглянуто вплив реактивних сил тертя на силу протяжки в конічній матриці відбувається зниження сили протяжки в радіусній матриці з великим радіусом робочої поверхні ( $R/d = 3,0$ ). Це дозволяє знизити контактний тиск і напруження на матрицю, а відповідно знизити її знос.

Зазначену мету роботи було досягнуто за рахунок підвищення стійкості протяжних матриць при використанні радіусної геометрії її західної частини.

Обмеження роботи полягають у тому, що не досліджено відносні радіуси заокруглень ( $R/d$ ) більше 3,0. Недоліків дана робота не має, тому що зазначений процес був досліджений всебічно та комплексно.

Протягування заготовки через радіусні матриці є новим способом. Для повної відповіді ефективності застосування цих матриць слід провести додаткові дослідження, які будуть спрямовані на дослідження впливу ще більших радіусів заокруглення протяжних матриць. Ці дослідження будуть предметом подальших досліджень авторів.

## ВИСНОВКИ

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено раціональний радіус заокруглення матриці  $R/d = 3,0$ , який забезпечує:

- інтенсивність напружень знизилася на 7...17 %, середні стискаючі напруження знизилися на 8...15 %, а нормальний тиск знизився на 10...15 % порівняно з меншими радіусами округлення;

- результуюча сила на робочу поверхню матриці знизилася на 40...55 %, а радіальна компонента цієї сили до 50 %;

- робоча поверхня матриць з різними радіусами розігрівається до однакової температури (750...850 °C), проте радіус заокруглення  $R/d = 3,0$  забезпечує зниження обсягу цієї розігрітої зони в 1.5...1.9 разів.

Експериментально було встановлено, що сила протяжки для цього радіусу заокруглення знизилася на 15...20 %, а стійкість протяжної матриці підвищилася на 20 %.

## REFERENCES

1. Pan Wang, Shijie Zhu, Liguang Wang, Lihong Wu, Shaokang Guan. A two-step superplastic forging forming of semi-continuously cast AZ70 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2015. 3(1), pp. 70-75
2. Karnaukh S.G., Markov O.E., Lysenko A.A. Research on the new process of separating hollow work-piece by eccentric torsion cutting for stamping. *FME Transactions*. 2024. 52 (1), pp. 29–36. <http://dx.doi.org/10.5937/fme2401029K>
3. Guan S.K., Wu L.H., Wang P. Hot forgeability and die-forging forming of semi-continuously cast AZ70 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering*. 2009. A 499, pp. 187–191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.136>
4. Subhash Chandra, Vikas Chawlab. Failure of Hot Forging Dies – An Updated Perspective. 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016) Materials Today: Proceedings. 2017. 4, pp. 1147–1157.
5. Aliiev I.S., Levchenko V.N., Markov O.E., Kalujniy A.V., Aliieva L.I., Sivak R.I. Development of devices for measuring contact friction forces in the processes of volumetric plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. 132(5–6), pp. 2839–2851. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13537-4>
6. Podgrajšek M., Glodež S., Ren Z. Failure analysis of forging die insert protected with diffusion layer and PVD coating. *Surface and Coatings Technology*. 2015. 276, pp. 521-528. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.021>
7. Ghalehandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*. 2020. 113, 10454. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
8. Qiang Chen, Haoyu Geng, Hongming Zhang, Xin Li, Gang Chen. Microstructure and mechanical properties of in situ TiB<sub>2</sub>/TiAl<sub>3</sub>/2024Al composite subjected to multidirectional forging. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. 21, pp. 2827-2840. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.098>
9. Ho Young Jeong, Joonhee Park, Yosep Kim, Sang Yun Shin, Naksoo Kim. Processing parameters optimization in hot forging of AISI 4340 steel using instability map and reinforcement learning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. 23, pp. 1995-2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.106>

10. Marek Hawryluk. Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. 16(4), pp. 845-866. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.06.001>

11. Markov O, Shevtsov S., Hrudkina N., Molodetskyi V., Musorin A., Zinskyi V. Testing a new technique for producing artillery cartridge cases from pipe workpiece by roughing with a friction tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 6/1 (126), pp. 91–97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291881>

12. Hawryluk M., Ziembra J. Possibilities of application measurement techniques in hot die forging processes, *Measurement*. 2017. 110, pp. 284–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.003>

13. Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Lysenko A. FEM study of the drawing method of hollow forgings with a bottom without a mandrel. *Materials Working by Pressure*. 2023. (1(52)), pp. 3–9. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52))

14. Markov, O., Stankov, V., Panov, V., & Zinskyi, V. Study of deformation method of hollow workpieces with bottom by dies with chamfer. *Materials Working by Pressure*. 2023. (1(52)), pp. 71–78. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)71](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)71)

15. Markov, O., Molodetskyi, V., Zinskyi, V., & Abhari, P. Experimental study of a new process of deformation of forgings such as sleeves. *Materials Working by Pressure*. 2023. (1(52)), pp. 79–85. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)79](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)79)

**Markov O., Zinsky V., Rovenskyi S., Molodetsky V. Design of a radius matrix for drawing high cartridge cases.**

*The paper examines the technical process of drawing high sleeves through a radius matrix. Research is aimed at solving an important and urgent scientific and technical problem of improving the technical process of broaching through a radius matrix using a mandrel when stamping hollow forgings such as sleeves and tall glasses. The developed method increases the service life of drawing matrices. The finite element method (FEM) was used to simulate the method of pulling tall sleeves through a radius matrix with different rounding radii. According to the simulation results, the optimal shape and dimensions of the radius matrix for drawing were developed. Recommendations for the development of radius matrices have been established. These recommendations consist in the appointment of the optimal radius of the working surface of the extension matrix. The received recommendations were experimentally verified in production conditions. It was established that the drawing of high sleeves through the matrix should be carried out at a relative radius of the working surface of the matrix  $R/d = 3$ . As a result, the intensity of stresses and average stresses on the working surface of the matrix were reduced by 8...15 %, and the normal pressures were reduced by 10...15 %. The total force and the radial component of that force have been reduced to 50%. According to the research results, it was determined that the surface of the matrix heats up to 700...800 °C, and the radius  $R/d=3$  reduces the size of this zone by 1.5.... 2.0 times. Verification of the obtained results was carried out in industrial conditions. It was established that the drawing force for the radius  $R/d=3$  is below 20%, and the stability of the matrix has increased by 20%. Thus, it is recommended to use radius matrices with  $R/d = 3$  for pulling sleeves.*

**Key words:** drawing, die, mandrel, cartridge cases, working area, wear, matrix stability, hollow workpiece, FEM.

**Марков Олег Євгенійович** – д-р техн. наук, зав. кафедрой АВП, ДДМА

**Markov Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

E-mail: [oleg.markov.omd@gmail.com](mailto:oleg.markov.omd@gmail.com)

ORCID: [0000-0001-9377-9866](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

**Зінський Володимир Миколайович** – аспірант ДДМА

**Zinskyi Volodymyr** – Graduate student, DSEA

E-mail: [dolomit.prodam@gmail.com](mailto:dolomit.prodam@gmail.com)

ORCID: [0009-0001-0504-7815](https://orcid.org/0009-0001-0504-7815)

**Ровенський Сергій Геннадійович** – аспірант ДДМА

**Rovenskyi Serhii** – Graduate student, DSEA

E-mail: [katapult13@gmail.com](mailto:katapult13@gmail.com)

ORCID: [0000-0002-4145-8413](https://orcid.org/0000-0002-4145-8413)

**Молодецький Віталій Васильович** – аспірант ДДМА

**Molodetskyi Vitalii** – Graduate student, DSEA

E-mail: [molv2876@gmail.com](mailto:molv2876@gmail.com)

ORCID: [0000-0002-2690-8354](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.