

ЛЕКЦІЯ 1

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

1. Класифікація процесів холодного об'ємного штампування і видавлювання

Технологія холодного об'ємного штампування (ХОШ) є ефективним методом виготовлення точних заготовок деталей машин. До ХОШ відносять процеси отримання заготовок, у яких розміри, форма і якість поверхонь максимально наближені до аналогічних параметрів готової деталі, внаслідок чого немає необхідності в подальшій обробці заготовки зі зняттям стружки, або вона зведена до мінімуму. Відношення площі необроблюваних поверхонь заготовок до площі всієї поверхні деталі у деталей, виготовлених холодним видавлюванням, може досягати 0,85...1,0.

Різновидності способів ХОШ, а також призначення і область їх застосування, приведені на рис. 1.1.

Процес відкритої осадки (схема А1) призначений для зменшення відносної висоти заготовки H/D і забезпечує калібрування вихідних заготовок для видавлювання по висоті і отримання паралельних торців заготовки, перпендикулярних осі симетрії. Закрита осадка (схема А1) використовується також для зменшення параметра H/D заготовок і для калібрування заготовок як по висоті, так і по діаметру.

Карбування (чеканка) – це процес формування рельєфу деталей типу монет і медалей (схема А3). Іноді за такою схемою об'ємне формування виконують зі значною деформацією, що дозволяє отримати складні деталі типу корпусів годинників відкритим штампуванням з облоєм.

Висадка (схеми Б1, Б2) – це процес осадження частини заготовки і створення місцевих потовщень на кінці або в середині стрижневої або трубчастої заготовки. Спосіб призначений для виробництва кріпильних і інших східчастих виробів. Використовується і для набору металу для подальшого штампування. Закрита висадка (схема Б3) – процес створення місцевих зовнішніх і внутрішніх потовщень і фланців при виробництві деталей типу кульових пальців, східчастих валів, штуцерів, кріпильних виробів.

Редукування (схема В1) – це процес штампування ступінчастих гладких валів, деталей, ступінчастих деталей з наскрізною і глухою порожниною, з шліцами і канавками методом обтиснення заготовок з малим ступенем деформації. Спосіб видавлювання (схема В2) відрізняється від редукування тим, що об'ємне деформування металу відбувається в закритій порожнині. Тому деформування виконується з високими ступенями формозмінення. Спосіб витяжки з потоншенням (схема В3) протікає з невеликими ступенями деформації, оскільки сила для деформування розтягненням передається через частину заготовки. Спосіб призначений для доробки видавлених деталей типу глибоких гільз і стаканів.

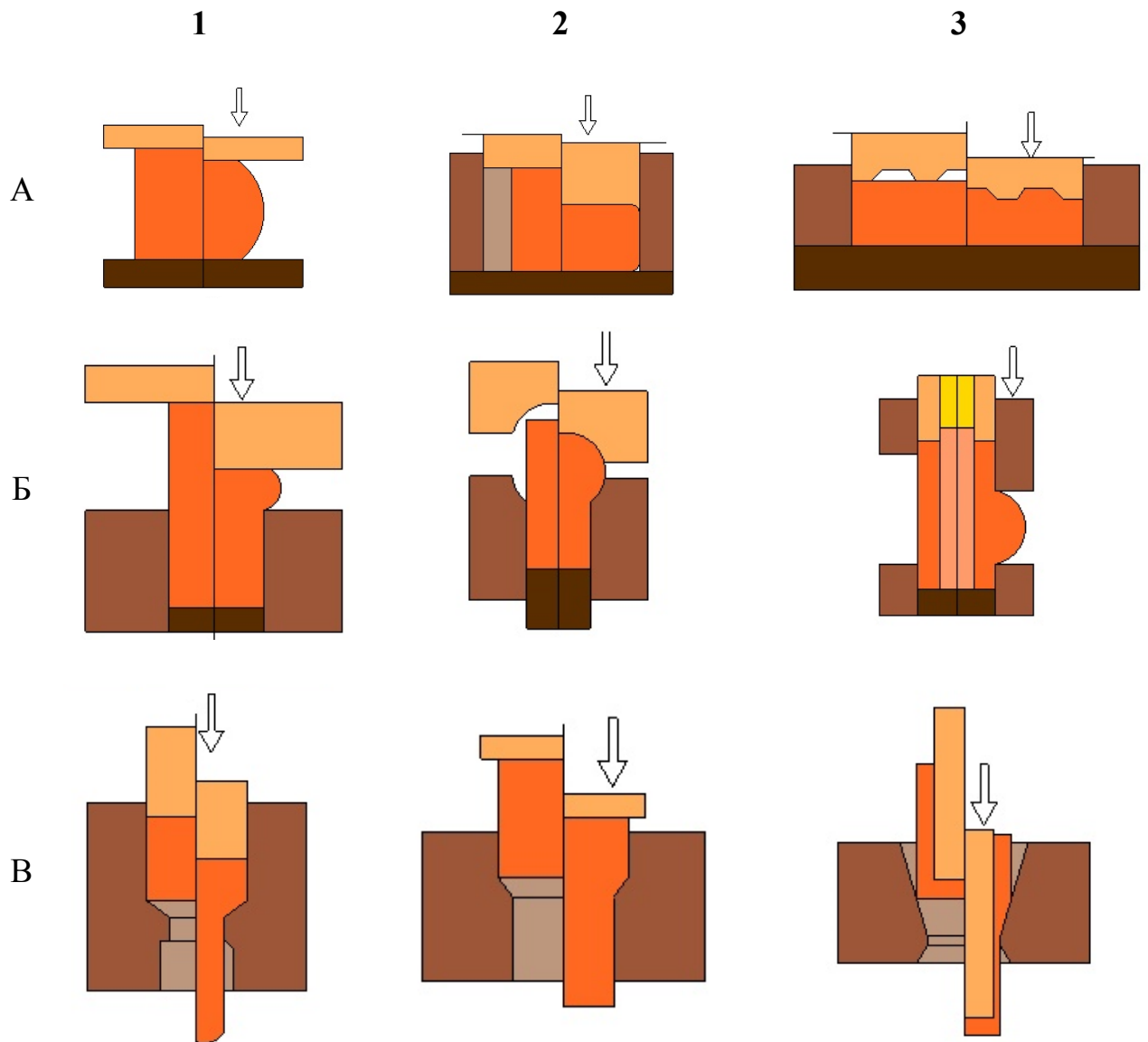


Рис. 1.1. Способи холодного об'ємного штампування

Одним з найбільш перспективних напрямків вирішення проблеми інтенсифікації (підвищення ефективності) процесів ХОШ за рахунок розширення технологічних можливостей цих процесів є розробка і освоєння нових ефективних технологічних способів холодного **видавлювання**.

Видавлювання – це спосіб об'ємного деформування шляхом витискування металу із закритої порожнини через отвір постійного перерізу.

Класифікацію способів видавлювання (рис. 2) здійснюють, як правило, на основі їх поділу на два класи:

- а) базові або прості основні способи;
- б) комбіновані способи, отримані шляхом з'єднання базових схем.

На рис. 1.2 показані у вигляді класифікації принципові схеми способів видавлювання. Залежно від співвідношення напрямків руху деформуючого

інструменту (напрямку дії деформуючої сили) і напрямку течії (витікання) металу заготовки перший клас простих способів видавлювання підрозділяється на дві групи: поздовжнє (1 – пряме і зворотнє) і поперечнє (2 – радіальнє і боковє).

Серед базових способів є також різновидності в залежності від кінематичного варіанту виконання способу деформування, типу вихідної заготовки, особливостей конструкції деталі і штампового оснащення (рис. 1.3).

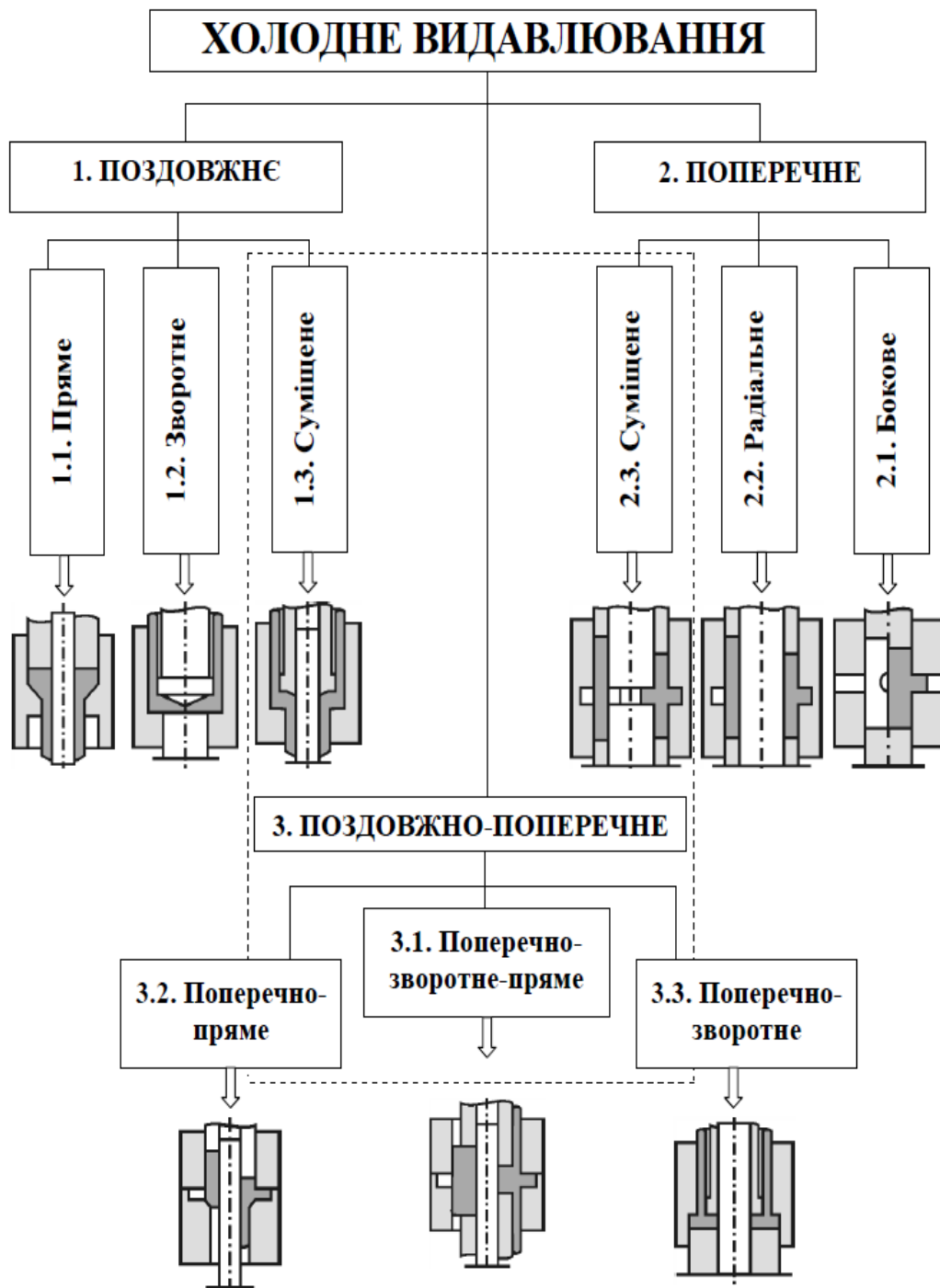


Рис. 1.2. Класифікація способів холодного видавлювання

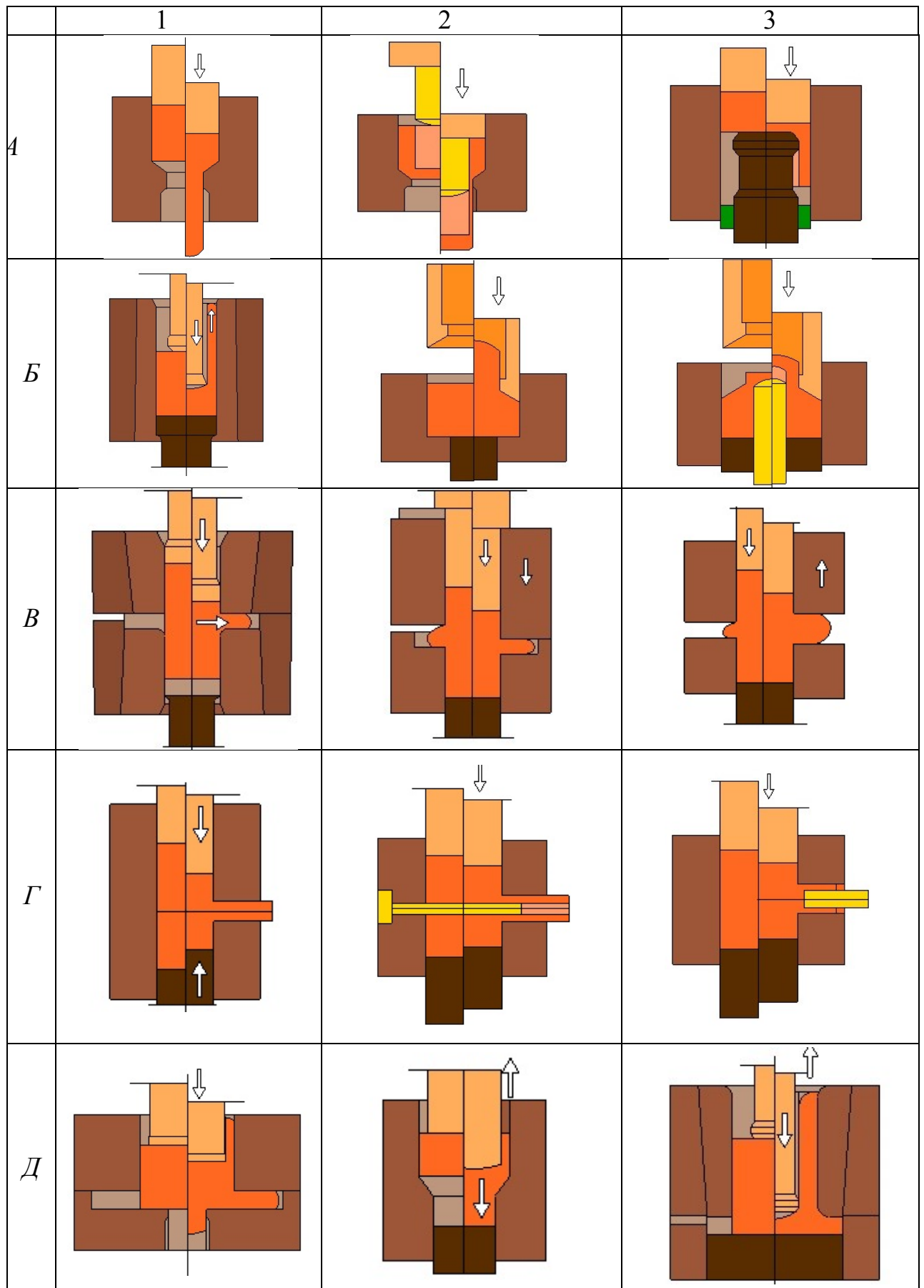


Рис. 1.3. Застосування способів холодного видавлювання для виготовлення деталей різного типу

Дослідження процесу радіально-прямого видавлювання з обтисненням на рухомій конічній оправці і встановлені закономірності дозволили розробити ряд нових способів комбінованого деформування. Одним з них є напівбезперервне видавлювання порожнистих деталей із змінною товщиною стінки (рис. 1.5).

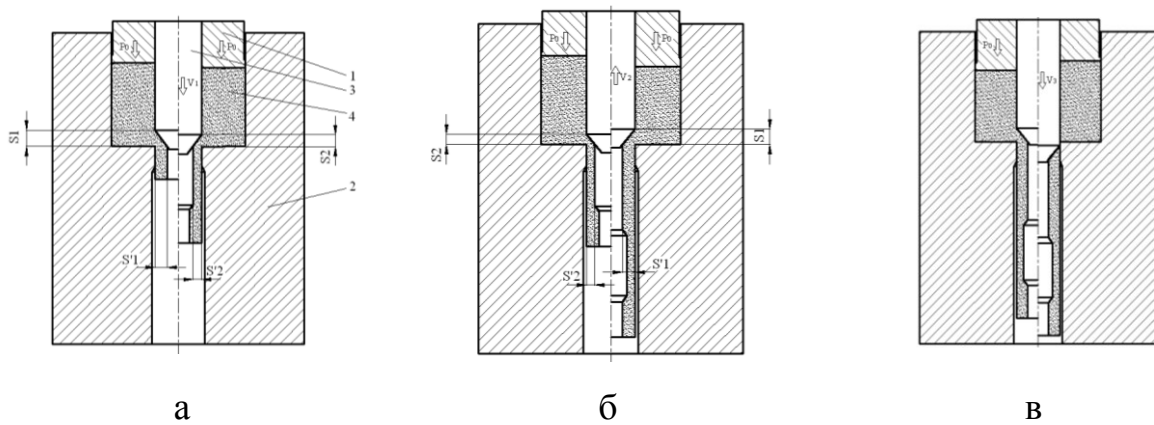


Рис. 1.5. Спосіб комбінованого видавлювання на конічній оправці: радіально-пряме видавлювання (а, б), відрізання готової деталі від багатштучної заготовки (в)

Даний спосіб реалізується шляхом виготовлення декількох деталей з однієї вихідної багатштучної заготовки напівбезупинним радіально-прямим видавлюванням в зазор, утворений між оправкою і матрицею. Відділення готової деталі від багатштучної заготовки здійснюється в зоні зміни напрямку течії металу з радіального на прямий шляхом переміщення оправки відносно матриці у напрямку руху пуансона при видавлюванні. Спосіб дозволяє за рахунок варіювання зазору між матрицею і оправкою також отримувати деталі типу втулок зі змінною товщиною стінки, яка значно розширює технологічні можливості процесу і номенклатуру штампованих деталей.

Реалізація способу поетапного видавлювання стаканів зі змінною товщиною стінки в новому штампі здійснюється за рахунок того, що пристрій додатково обладнаний проміжною плитою, на якій встановлюється формоутворююча матриця, та приводом для заданого узгодження переміщення матриці. Виконання у вигляді основному двох змонтованих на нерухомій плиті гідроциліндрів, штоки, які з'єднані з проміжною плитою, при цьому порожнина матриці виконано профільованою (рис. 1.6).

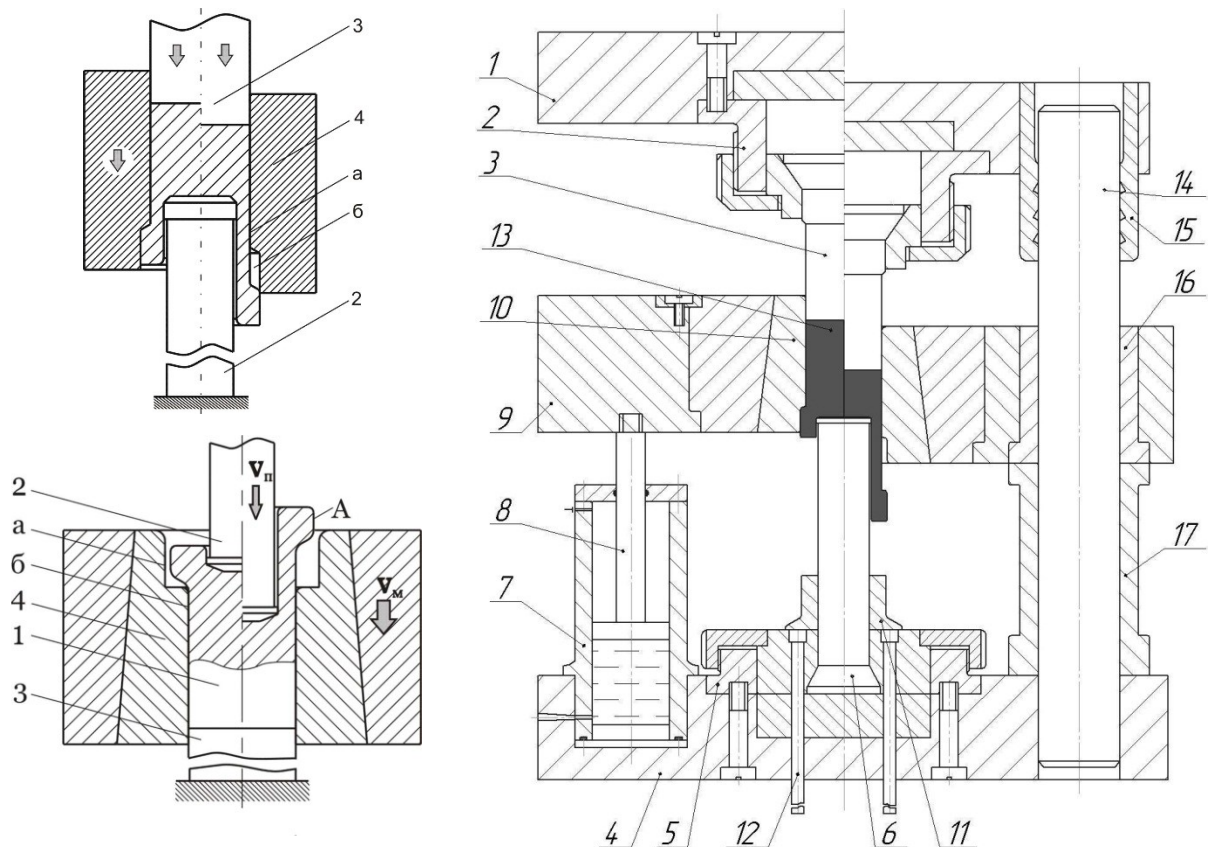


Рис. 1.6. Схема штампа для реалізації способу комбінованого видавлювання порожнистих деталей зі перемінною товщиною стінки

Способи видавлювання деталей з керуванням кінематикою течії металу

Обмеження, властиві відомим способам поперечного видавлювання з односторонньою подачею металу в приймальню порожнину. Усунення нерівномірності деформування можна досягти за рахунок того, що за новим способом процес виконують в дві стадії, при цьому на першій стадії виконують видавлювання з односторонньою подачею за рахунок деформування частини заготовки, розташованої з одного боку від порожнини матриці (рис. 1.7, а). На іншій стадії здійснюють видавлювання з двосторонньою подачею металу частин заготовки, що деформується, розташованих по обидві сторони від порожнини матриці.

У тих випадках, коли видавлювання з двосторонньою подачею неможливо здійснити через особливості конструкції деталі, на першій стадії здійснюється висадка заготовки, а на другій стадії, навпаки, виконують видавлювання з односторонньою подачею в порожнину матриці металу відростка напівфабрикату, що деформується, розташованої зверху від порожнини (рис. 1.7, б).

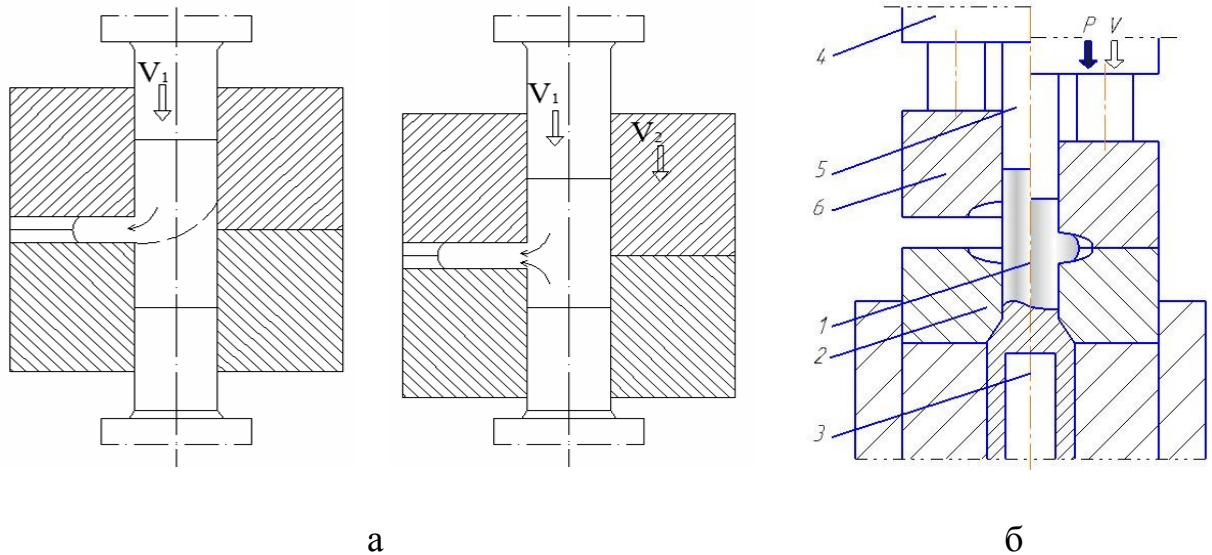


Рис. 1.7. Способи поперечного видавлювання с регульованою подачею металу в порожнину матриці

Комбінування висадки з видавлюванням є суттю нових способів деформування, спрямованих на підвищення об'ємів фланців, що видавлюються, усунення відхилень форми і збільшення граничних діаметрів цих фланців (рис. 1.8), а також підвищення ступеня опрацювання металу по всьому об'єму виробів, що видавлюються (рис. 1.9).

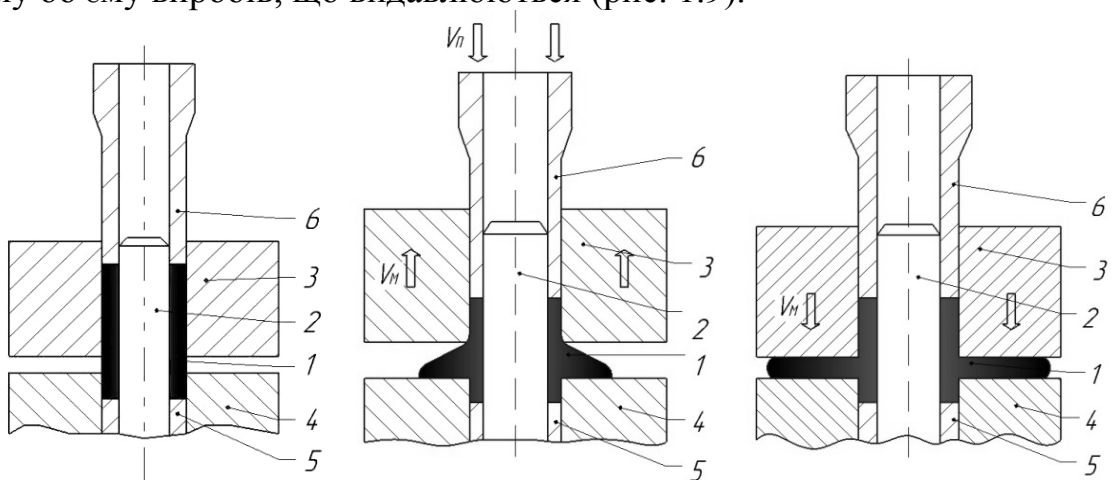


Рис. 1.8. Спосіб комбінування радіального видавлювання с висадкою фланця

Для зниження або повного усунення такого дефекту, як утягнення на дні стакану, можливе використання сил контактної тертя, зокрема шляхом виконання процесу в режимі реверсивного тертя (рис. 1.10).

Завдання зменшення чи усунення утягнення можна вирішити за рахунок того, що на бічній поверхні в зоні дна стакану (рис. 1.11) або на дні стакану (рис. 1.15) формують зовнішній кільцевий виступ (бурт) шляхом

заповнення заглиблення, яке передбачене в матриці або в торці контрпуансона.

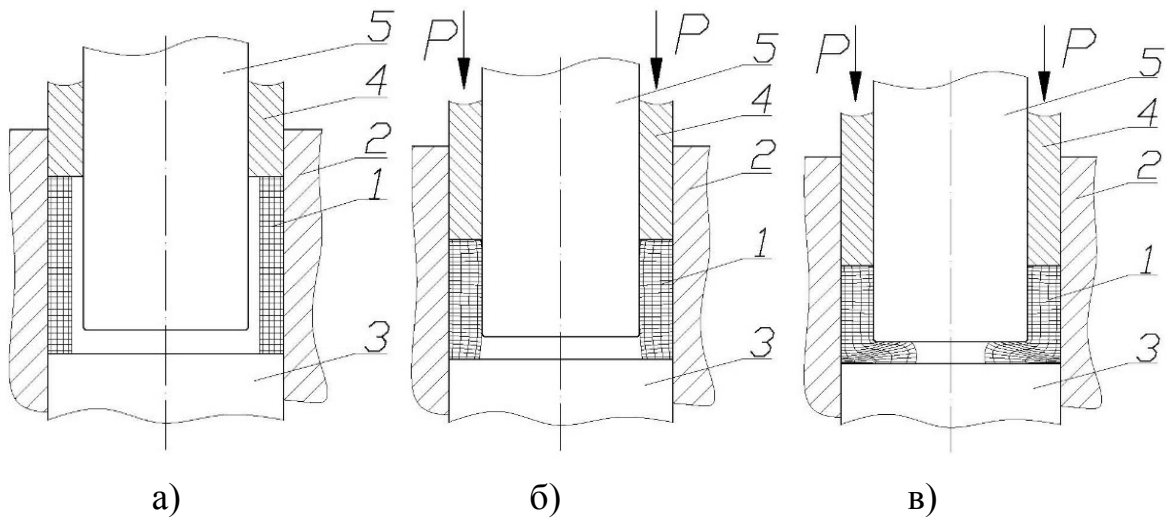


Рис. 1.9. Спосіб комбінування радіального видавлювання с висадкою вихідної заготовки і фланця

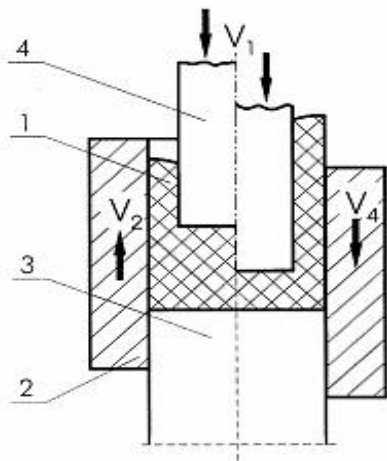


Рис. 1.10. Спосіб видавлювання з реверсивним тертям [8, 53]

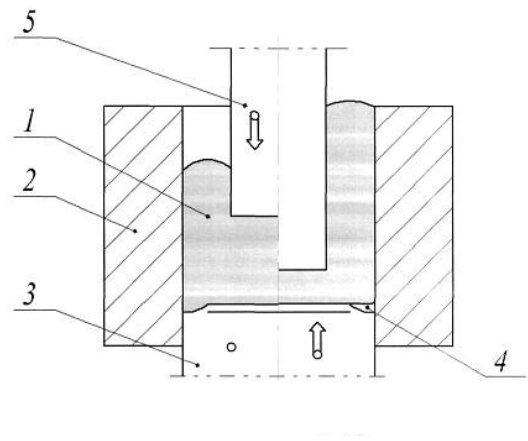


Рис. 1.11. Спосіб попередження утягнень

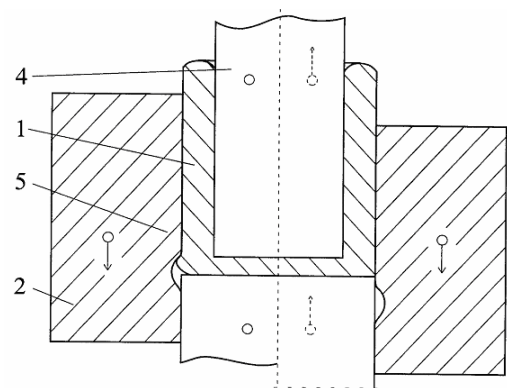
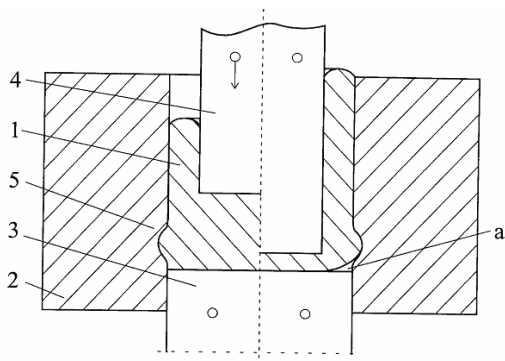


Рис. 1.12. Спосіб усунення утягнення за допомогою технологічного бурта

Способи інтенсифікації пластичного деформування

Задачею способів інтенсифікації пластичної деформації є розширення технологічних можливостей та покращення якості виробів за рахунок забезпечення проробки металу і зниження нерівномірності деформованого стану. За способом видавлювання порожнистих деталей ця задача вирішується за рахунок того, що деформування відбувається в два етапи таким чином, що на першому етапі одночасно виконують зворотне видавлювання стінки стакану та пряме видавлювання з утворенням технологічного відростку в донній частини стакану, а на другому етапі відбувається витіснення металу з технологічного відростку назад у донну частину стакану (рис. 1.13). Знакозмінна деформація, якій піддається метал в донній частині напівфабрикату – стакану за рахунок спочатку прямого, а потім зворотного витискування (видавлювання) металу в донну частину, забезпечує добру проробку металу цієї донної зони.

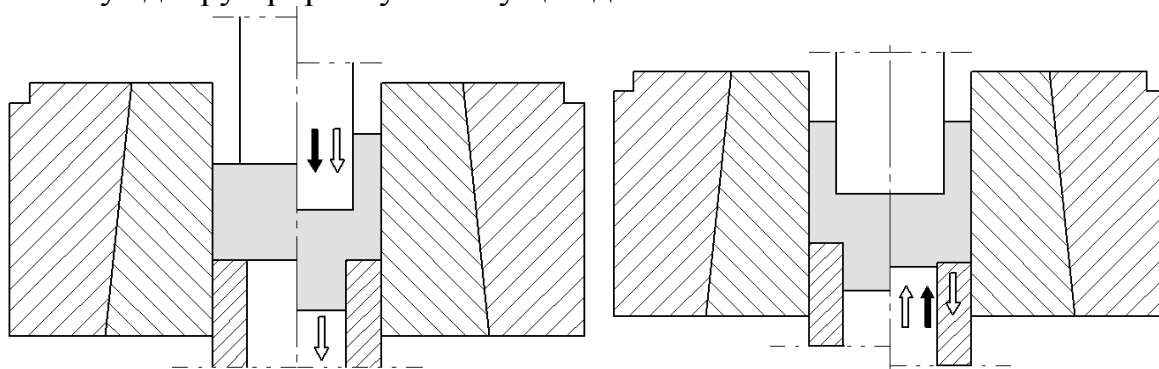


Рис. 1.13. Спосіб зниження нерівномірності пластичного деформування

Для розширення номенклатури заготовок із підвищеними механічними властивостями спочатку отримують порожнисту циліндричну заготовку із підвищеними механічними властивостями циклічним багаторазовим радіально-прямим видавлюванням в зазор, який утворюється між матрицею із конічною ділянкою та ступінчастою конічною оправкою. Після отримання циліндричної заготовки із підвищеними механічними властивостями її розрізають вздовж вісі симетрії та вигинають в полотно (рис. 1.14) [70].

Способи знакозмінного деформування корисні й для виготовлення деталей з фланцем. Спосіб полягає у радіальному видавлюванні металу заготовки в кругову порожнину та відрізняється тим, що заготовка попередньо редукується у нижній (рис. 1.15, а) або верхній напівматриці (рис. 1.16, б). При обтисненні заготовки створюється сприятлива схема напружено-деформованого стану, а саме всебічне стиснення, що підвищує якість поверхневих шарів заготовки і пластичність металу, так як «заліковує» мікротріщини та дефекти поверхневого шару заготовки та сприяє кращій обробці металу у фланці на стадії радіального видавлювання.

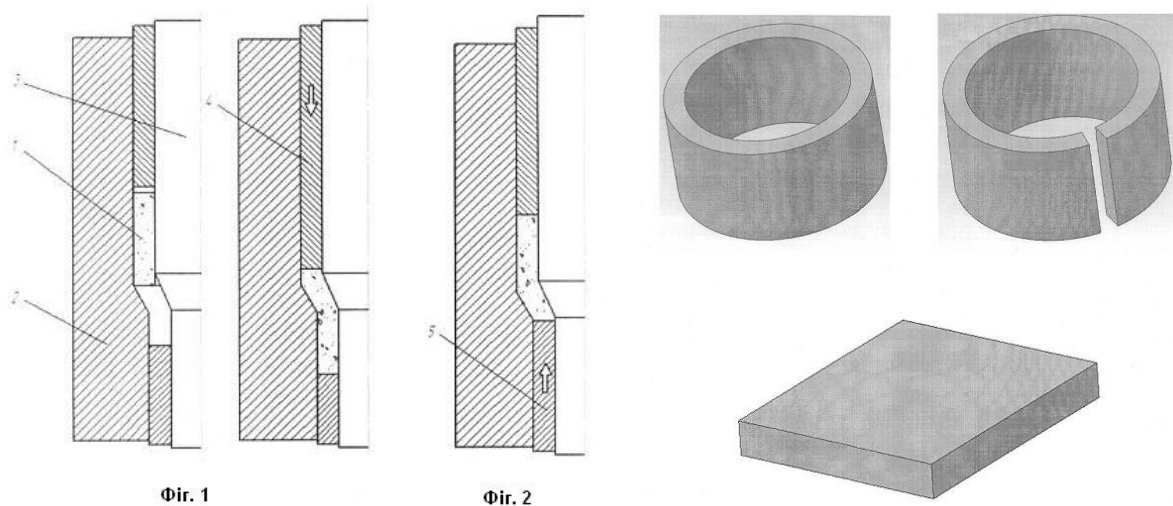


Рис. 1.14. Спосіб інтенсивного пластичного деформування

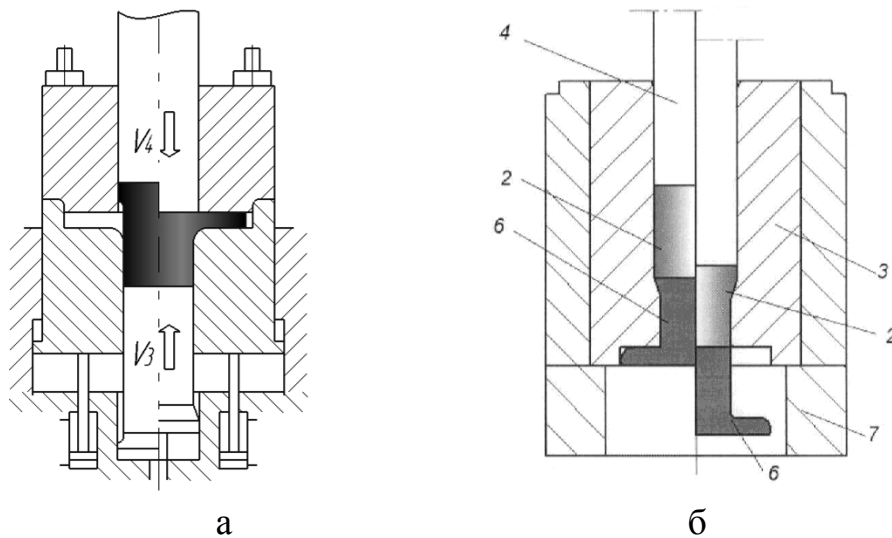


Рис. 1.15. Способи комбінування процесів обтиснення заготовки і радіального видавлювання (способи знакозмінного деформування)

1.3. Забезпечення якості деталей в процесах холодного видавлювання

Параметри, що визначають якість деталей, отриманих холодним видавлюванням, можна розділити на 5 великих груп: відхилення форми і розташування поверхонь деталей, неточність розмірів, якість поверхні, нерівномірність деформованого стану, а також тріщини і руйнування. Серед них найбільш поширеними і тими, що обмежують технологічні можливості процесів, можна вважати відхилення форми і тріщини. При цьому, вони є характерними для більшості способів видавлювання, хоча є і дефекти, властиві тільки окремим схемами деформування. Більшість даних дефектів з'являються внаслідок недосконалості умов деформування і конструкції

інструменту та вимагають теоретичного і експериментального вивчення, особливо стосовно до нових способів деформування. Визначення критичних з точки зору дефектоутворення параметрів процесу дозволить оцінити можливість розширення сфери застосування технологій видавлювання.

Загальноновизнаним і характерним дефектом для процесів холодного видавлювання, що знижує якість деталей і технологічні можливості процесу, є відхилення форми у вигляді утягнень, які утворюються в зоні формування фланця. Залежно від схеми видавлювання дефекти подібного роду можуть виникати як на різних стадіях процесу, так і в різних зонах деталі, що формується (рис. 1.16). Для процесу зворотного видавлювання деталей типу стакан характерною є поява утягнення у вигляді відходу металу в донній частині біля стінки матриці на заключних стадіях процесу при товщині дна менше, ніж товщина стінки порожнистої частини (див. рис. 1.16, схема 1). Так само на заключній стадії можливе відшарування металу від торця пуансона при прямому видавлюванні втулки при товщині фланця меншій, ніж товщина стінки порожнистої частини (схема 2). При радіальному видавлюванні відносно товстих фланців на кінці або в середній частині трубчастої заготовки (схема 3) на початковій стадії характерним дефектом є роздача отвору в зоні фланця, який формується, з утворенням утягнення.

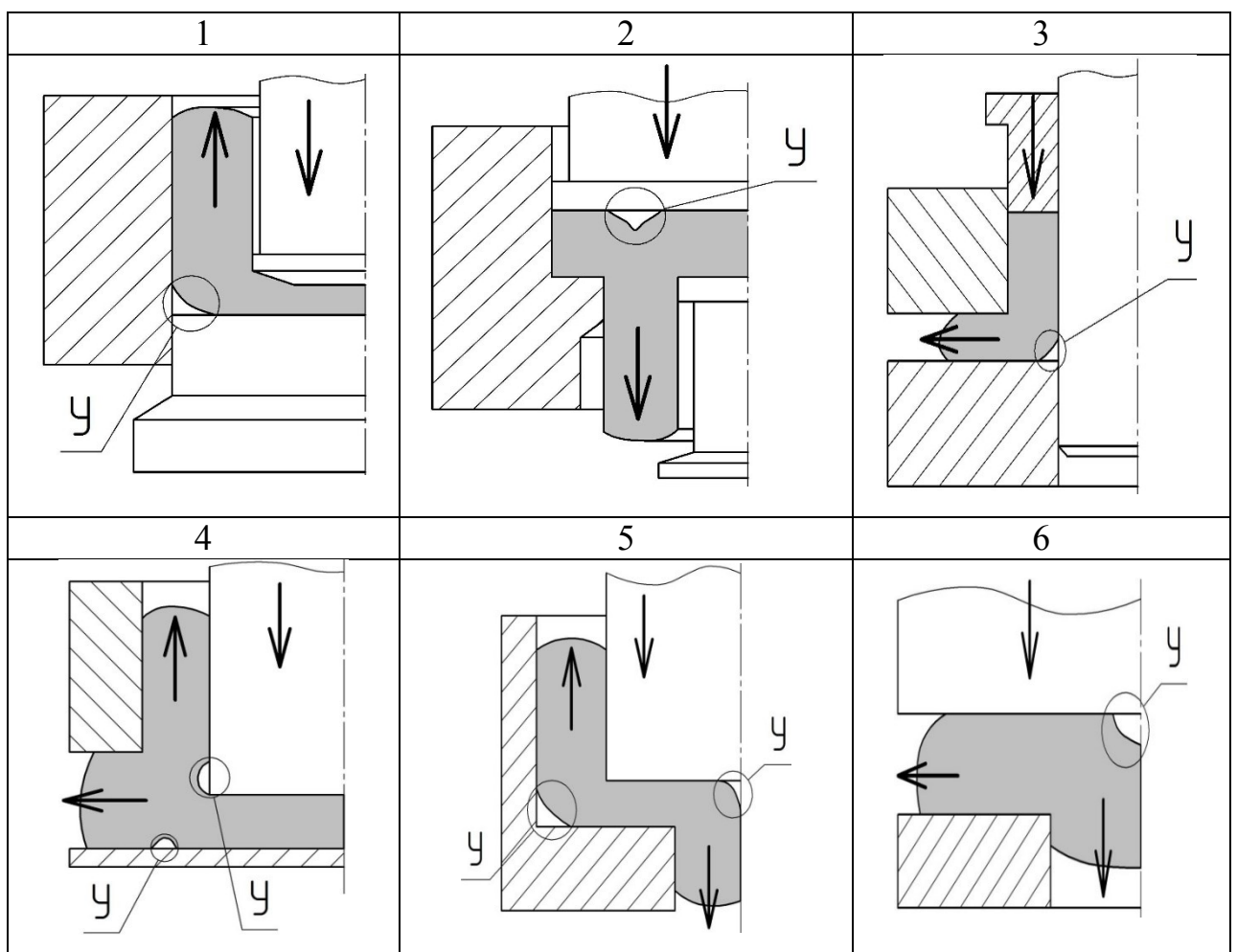


Рис. 1.16. Схеми утворення дефектів типу утягнень

При комбінованому радіально-зворотному видавлюванні утягнення виникають в порожнині або зовні на дні стакану (схема 4). Утягнення виникають через випереджальну течію зовнішніх шарів стінки стакану або внутрішніх шарів біля стрижня при прямому видавлюванні (див. рис. 1.16, схеми 5 і 6; рис. 1.17, а). Установчі фізичні та комп'ютерні експерименти дозволяють виявити характер відхилень форми деталей, отриманих різними способами видавлювання.

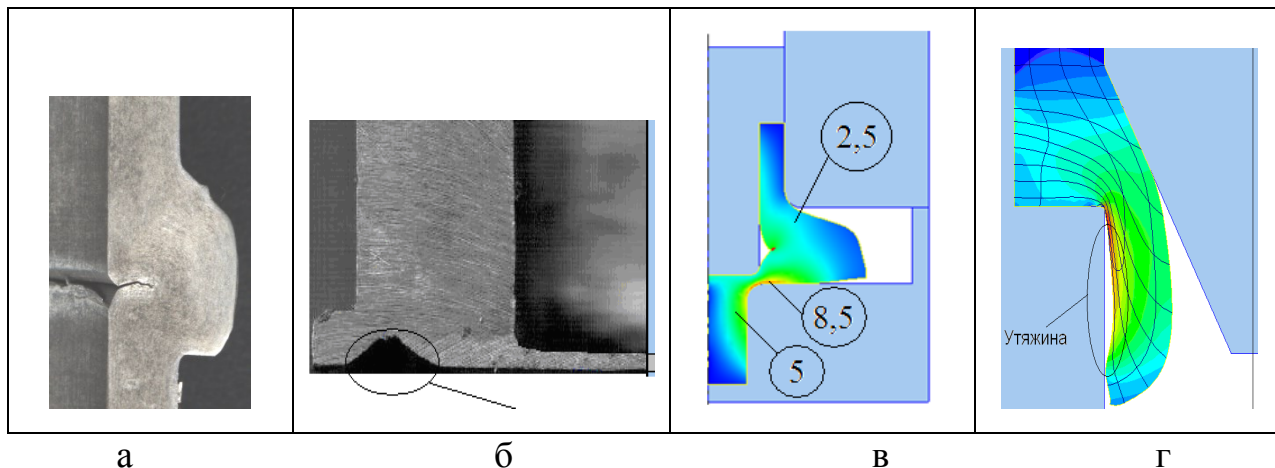


Рис. 1.17. Дефекти форми типу утягнень у деталей, які отримані за різними технологічними схемами

Для процесу радіального видавлювання фланців характерними дефектами, крім викривлення форми фланців, є і утягнення, які з'являються на внутрішній поверхні порожнистої заготовки (див. рис. 1.17, б; рис. 1.18, п. 1) при значеннях висоти приймальної порожнини, що перевищують товщину стінки трубчастої заготовки.

Дефекти типу внутрішніх утягнень (прострелів) при комбінованому видавлюванні (див. рис. 1.17, в) виникають переважно через інтенсивну радіальну течію металу при наближенні пуансона до зони розташування фланця. Утягнення у вигляді неприлягання зовнішнього контуру деталі до поверхні матриці є характерним дефектом форми також і для процесу радіально-прямого видавлювання на конусній оправці (див. рис. 1.17, г). СЕ-моделі процесів видавлювання показують досить близькі до дослідних відхилень форми деталей. Прогнозування утворення дефектів у вигляді утягнень при радіальному і прямому видавлюванні за допомогою МСЕ-моделей (див. рис. 1.18 і рис. 1.19) дозволяють встановити область раціональних параметрів деталей.

Обробка результатів комп'ютерного моделювання дозволила побудувати діаграму, на якій область вище кривої відповідає зоні утворення дефектів типу утягнень. Слід зазначити, що запобігання цього виду утягнень становить значну складність, обумовлену недоступністю зони появи дефекту. Подальше усунення дефекту деталей, який виникає, можливо шляхом висадки фланця після завершення видавлювання.

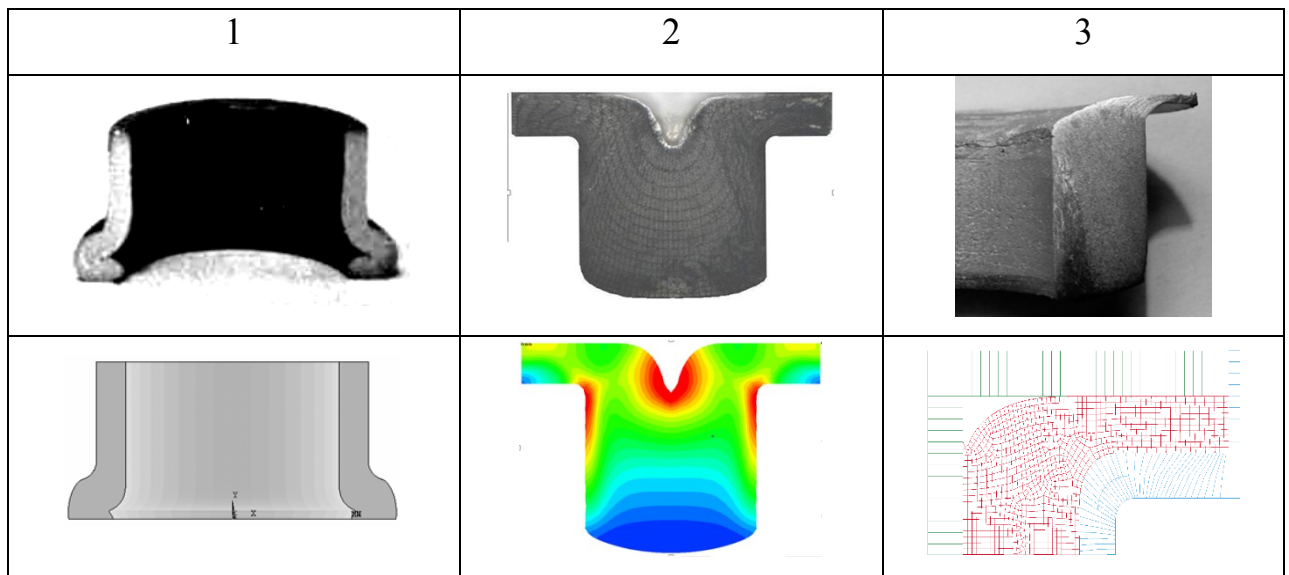


Рис. 1.18. Зіставлення результатів експериментальних і комп'ютерних досліджень прогнозування дефектів типу утягнень

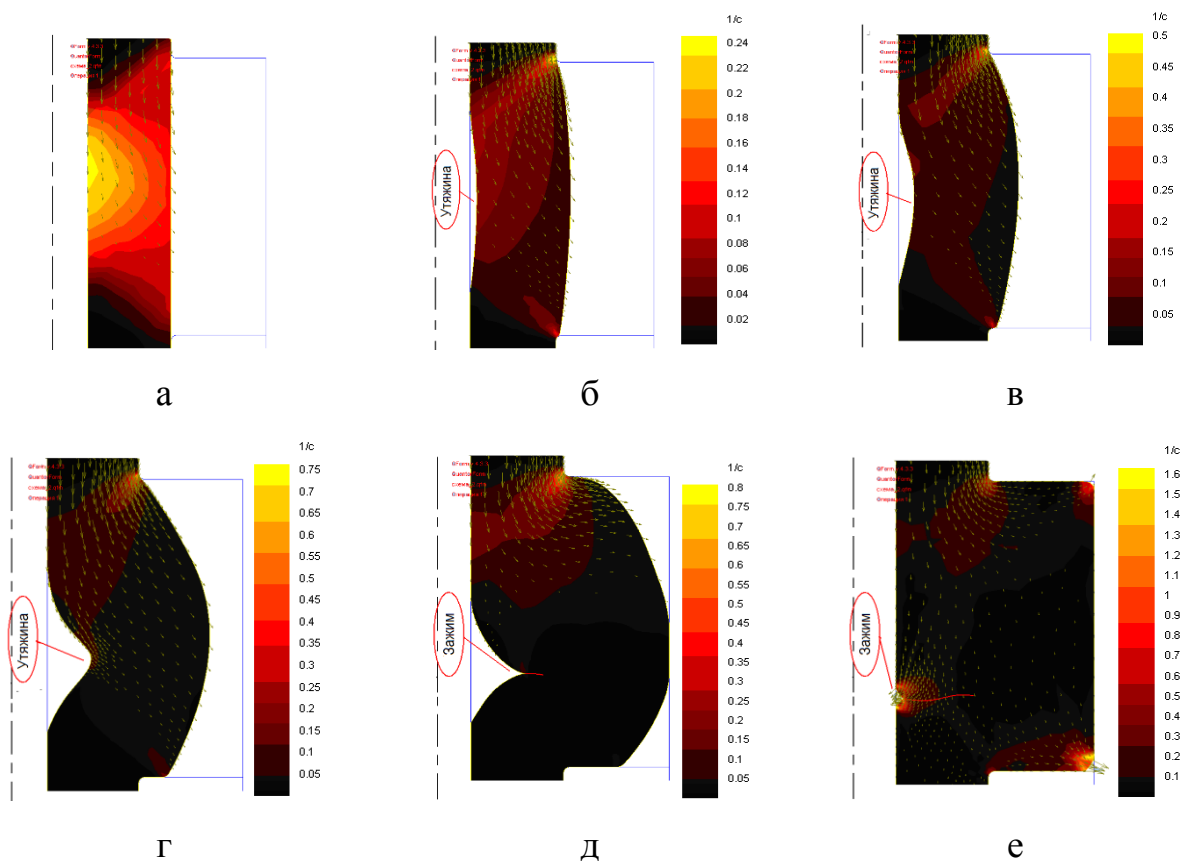


Рис. 1.19. Послідовність утворення дефектів типу утягнень і складок в процесі радіального видавлювання фланця на порожнистій заготовці

Характерні види дефектів і відхилень форми деталей, отримані за різними схемами комбінованого видавлювання, наведені як на рис. 1.20 (ряди *D* і *E*), так і на рис.1.21 і 1.22.

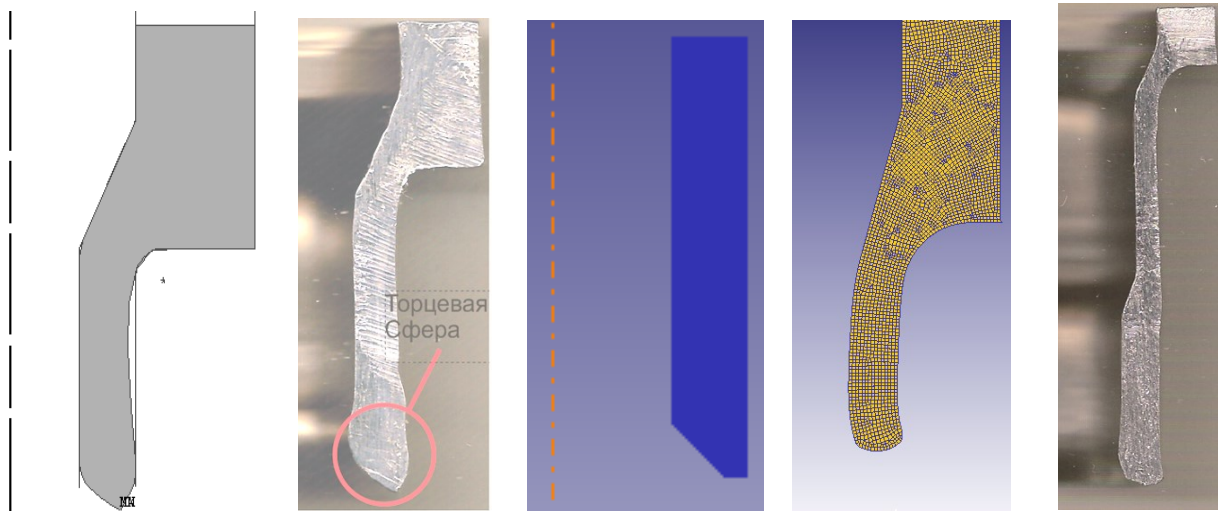


Рис. 1.20. Дефект «торцева сфера», спеціально підготовлена заготовка і деталь, що отримана радіально-прямим видавлюванням



Рис. 1.21. Дефекти у вигляді викривлення відростка і складок у процесі радіально-прямого видавлювання з обтисненням



Рис. 1.22. Дефекти форми деталей, отриманих радіально-зворотним видавлюванням

При радіальному видавлюванні фланців, як в простому процесі, так і в комбінованих процесах, руйнування кромки фланців викликане вичерпанням запасу пластичності металу, що зазнає розтягування в коловому напрямку (див. рис. 1.23, поз. 1а, 2а). При суміщеному видавлюванні границі розділу течії металу нерідко стають траєкторіями тріщин. При поперечно-зворотному

видавлюванні стакану руйнування можливе, якщо товщина його дна менше товщини фланця (схема *F4*). Вивільнення матриці в заключній стадії запобігає такому руйнуванню. Для схем поєднаного поперечно-прямого видавлювання небезпечно раннє формоутворення фланця (або відростка), який потім перетворюється в застійну зону. Для поетапного видавлювання стаканів з фланцем характерне відділення фланця або дна, викликане неузгодженістю руху матриці або протипуансона (схема *E4*).

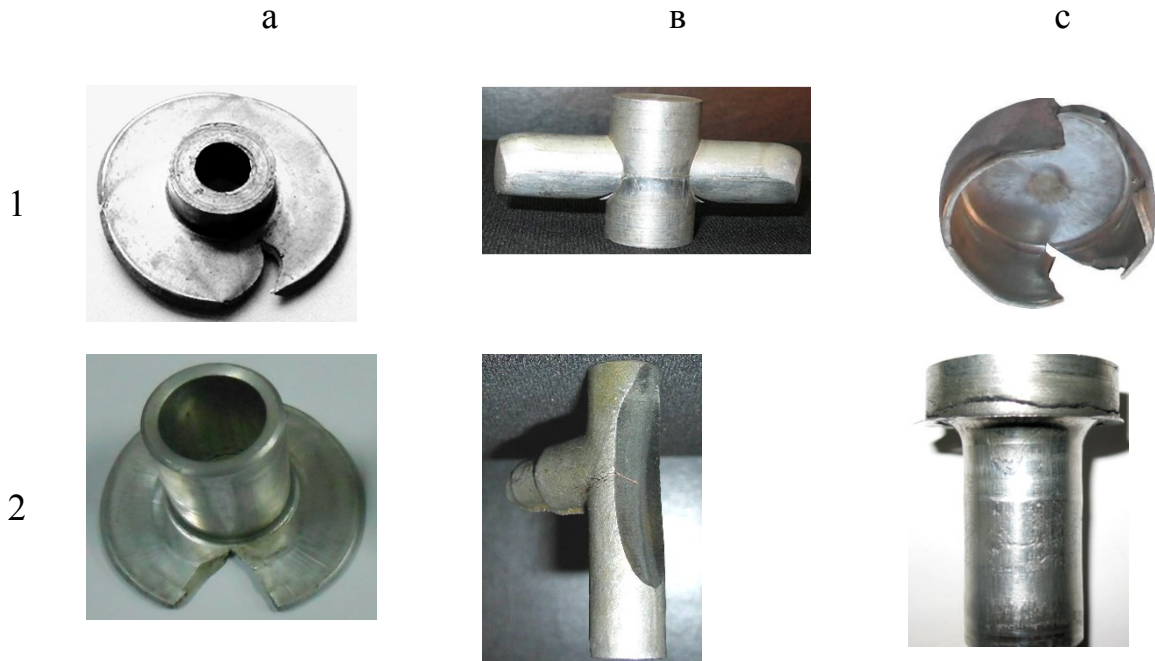


Рис. 1.23. Дефекти у вигляді руйнувань при радіальному і комбінованому (а), боковому (в) і комбінованому радіально-прямому видавлюванні з роздачею і обтисненням (с)

Нерівномірність деформованого стану заготовок при холодному видавлюванні

Задача отримання якісної продукції вимагає забезпечення максимально можливої рівномірності деформації заготовки при одночасному значному опрацюванні структури, подрібненні зерна та ізотропному (по можливості) зміцненню металу.

Деформований стан заготовки в процесах видавлювання деталей з фланцем досліджували МСЕ і за допомогою методів твердості і ділильної сітки.

Для дослідження процесу зворотного видавлювання порожнистого виробу пуансоном з конічним торцем використовували заготовки ($D_z = 40$ мм, $H_z = 50$ мм) зі сталі AISI 1010 ($\sigma_{0.2} = 300$ МПа). Коефіцієнт тертя $\mu = 0,08$. Моделювання виконували з застосуванням МСЕ-програми DEFORM. При видавлюванні зі ступенем деформування $\varepsilon = 10\%$ має місце значна

нерівномірність деформації і пропрацювання структури металу по ширині стінки виробу. Отримано значення $\varepsilon_i = 1,4$ в прошарках металу, що знаходяться поблизу порожнини, і $\varepsilon_i = 0,18$ на середині стінки виробу. Зовнішні прошарки металу в стінці стакану практично не деформуються. Формоутворення порожнистих виробів з $\varepsilon = 40\%$ призводить до досягнення величини $\varepsilon_i = 1,5$ в прошарках металу поблизу порожнини і $\varepsilon_i = 0,65$ в зовнішніх прошарках металу стінки виробу. Інтенсивне пропрацювання металу пластичною деформацією по ширині стінки виробів відбувається при видавлюванні зі ступенем деформації $\varepsilon = 50\%$ і вище.

При поперечному (радіальному і боковому) видавлюванні сильний вплив на характер розподілу деформацій по висоті осередку деформації надає кінематична схема подачі металу. Різницю в деформованому стані деталей, отриманих видавлюванням з односторонньою подачею металу (одностороннє видавлювання) і двостороннім видавлюванням можна продемонструвати на прикладі викривлення ділильної сітки, нанесеної на заготовку перед поперечним видавлюванням (рис. 1.24). При односторонньому поперечному (як бічному, так і радіальному) видавлюванні осередок інтенсивної деформації має несиметричну форму. Зона максимальної деформації і, відповідно, зона максимального зміцнення зміщуються до нижньої границі осередку деформації, на якій відбувається різкий стрибок ступеня деформації металу. При двосторонньому видавлюванні осередок деформації (ОД) розташовується в середній частині заготовки і симетричний відносно вертикальної і горизонтальної осей заготовки, а отримані фланці відповідно мають симетричну клиноподібну форму з товщиною біля кромки, яка зменшується по мірі збільшення діаметра фланця. Дана схема деформування більш сприятлива з точки зору якості отриманого виробу і силового режиму. Але при двосторонньому поперечному видавлюванні осередок деформації має меншу висоту і об'єм, що може бути в ряді випадків недоліком, оскільки на перехідних навантажених ділянках метал може бути недостатньо зміцненим.

Як видно з рис. 1.25, зона максимального зміцнення при односторонній подачі металу, як і зона максимального напруження, примикає до нижньої границі осередку деформації. Найбільше зміцнення набувають частки металу, розташовані в перехідній (з центральної зони під фланець) зоні деталі. А при двосторонній подачі металу максимальне зміцнення і зона максимального напруження знаходяться в центрі осередку деформації.

При двосторонній подачі розподіл напружень в осередку симетричний на всіх стадіях видавлювання, а пік значень інтенсивності напружень приходить на горизонтальну вісь симетрії. Для одного і того ж значення ходу пуансона величина інтенсивності напружень для двостороннього деформування вище, ніж при видавлюванні з односторонньою подачею.

При поперечному видавлюванні найбільшій деформації піддаються шари металу, що прилягають до центру відростка, який видавлюється. При видавлюванні без конічної перехідної ділянки, тобто безпосередньо на виході з

контейнера в бічну порожнину висотою h_2 (модуля А), коефіцієнт нерівномірності деформації знаходиться в межах від 1,7 до 2,3 (рис. 1.26).

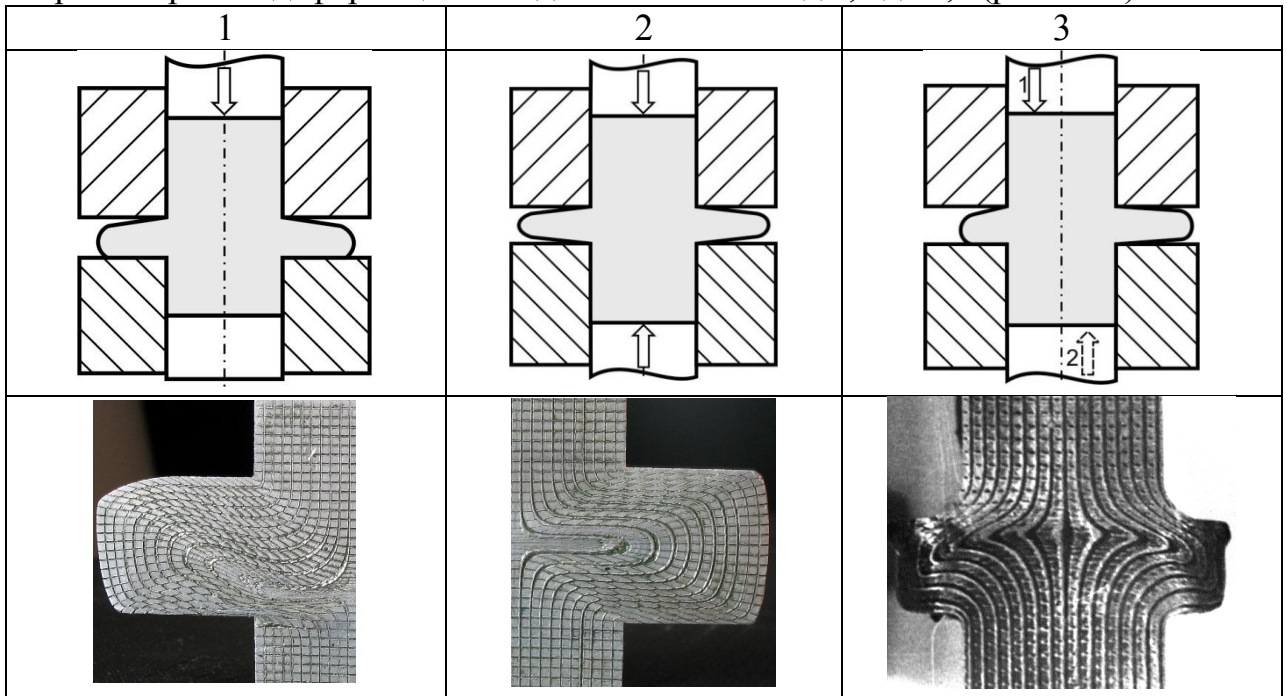


Рис. 1.24. Схеми деформування і зразки, отримані одностороннім, двостороннім і послідовним двостороннім видавлюванням металу

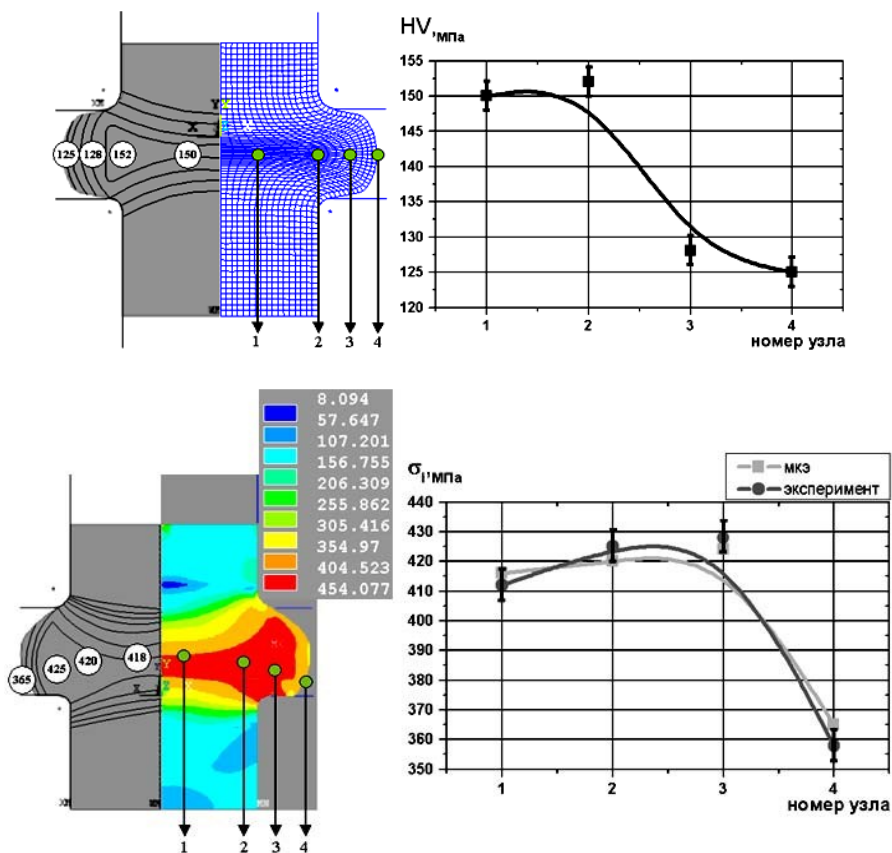


Рис. 1.25. Аналіз напружено-деформованого стану при радіальному видавлюванні методами вимірювання твердості і МСЕ (аркуш 1)

Для поліпшення експлуатаційних властивостей навантажених виробів необхідне кероване формування структури перехідних зон з метою запобігання утворенню текстури або вичерпання ресурсу пластичності. Різні поєднання рухів і навантажень пуансонів дозволяють регулювати положення зони максимального зміцнення металу по висоті осередку деформації.

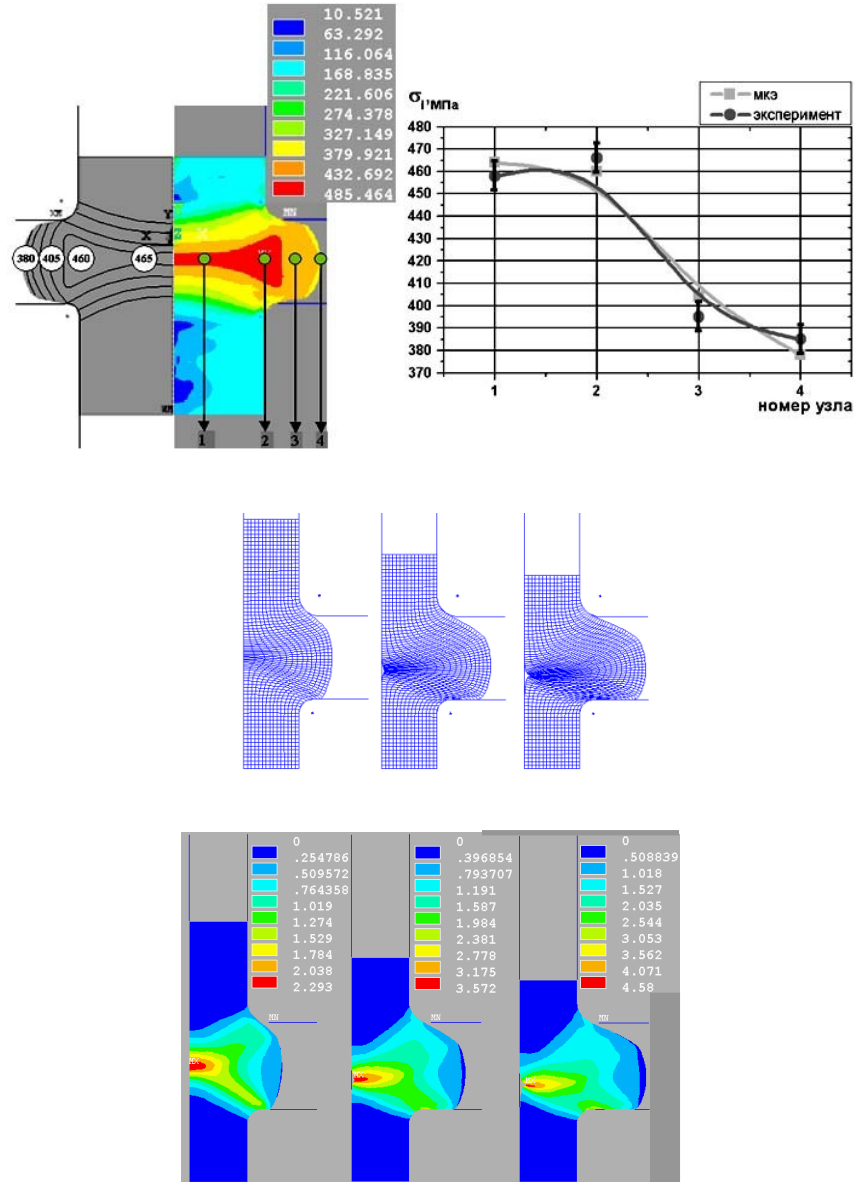


Рис. 1.25. Аналіз напружено-деформованого стану при радіальному видавлюванні методами вимірювання твердості і МСЕ (аркуш 2)

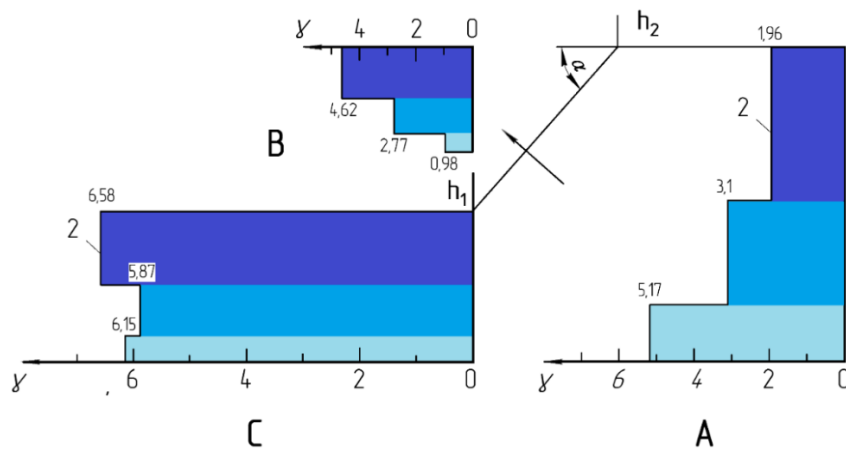


Рис. 1.26. Підвищення рівномірності деформованого стану при поперечному видавлюванні

При дослідженні процесу суміщеного радіально-прямого видавлювання було встановлено, що картини викривлення ділильної сітки, отримані в програмі Qform2D, добре узгоджуються з характером реальної течії металу (рис. 1.27, а). Аналізуючи залежність положення границі (поверхні) розділу течії від параметрів процесу, слід зазначити, що процес супроводжується зрушенням по цій границі і швидкість прямого витікання прагне до швидкості деформування. Це супроводжується небезпекою появи тріщин на границях зсуву металу відносно вже zdeформованої частини деталі, яка стає застійною зоною. У програмі Qform поверхневі лінії – це засіб діагностики внутрішніх і поверхневих дефектів в заготовках при штампуванні. Якщо ці лінії проникають всередину заготовки – це вказує на небезпеку виникнення дефекту (див. рис. 1.27, а). До таких дефектів відносяться різного роду утягнення і простріли, попередні руйнування деталей.

Для розширення діапазону розмірів, підвищення складності отримуваних деталей і поліпшення якості штампованих деталей ефективний спосіб комбінованого видавлювання в рухомій матриці. За даним способом за рахунок поділу осередків деформації видавлювання в прямому і поперечному напрямках з роздільних зон заготовки можливе переміщення значного об'єму металу як в поперечну порожнину матриці, так і в прямому напрямку без утворення руйнувань (рис. 1.27, б).

Дефекти при видавлюванні і нерівномірність інших схем комбінованого видавлювання (див. рис. 1.27, нижній ряд) показує складність процесів і необхідність керування формозміною і процесом деформування з великими ступенями свободи течії.

На рис. 1.28–1.30 наведені приклади створення нерівномірності деформованого стану і деталей з характерними руйнуваннями, отриманими при видавлюванні з односторонньою подачею металу в поперечну порожнину, і схеми відповідних способів, спрямованих на запобігання подібних руйнувань. При боковому видавлюванні з односторонньою подачею відростків (див. рис. 1.28, схема 1) тріщини вздовж нижньої границі ОД з'являються як при

деформуванні високопластичних алюмінієвих сплавів, так і при видавлюванні в напівгарячому стані (див. рис. 1.29, а).

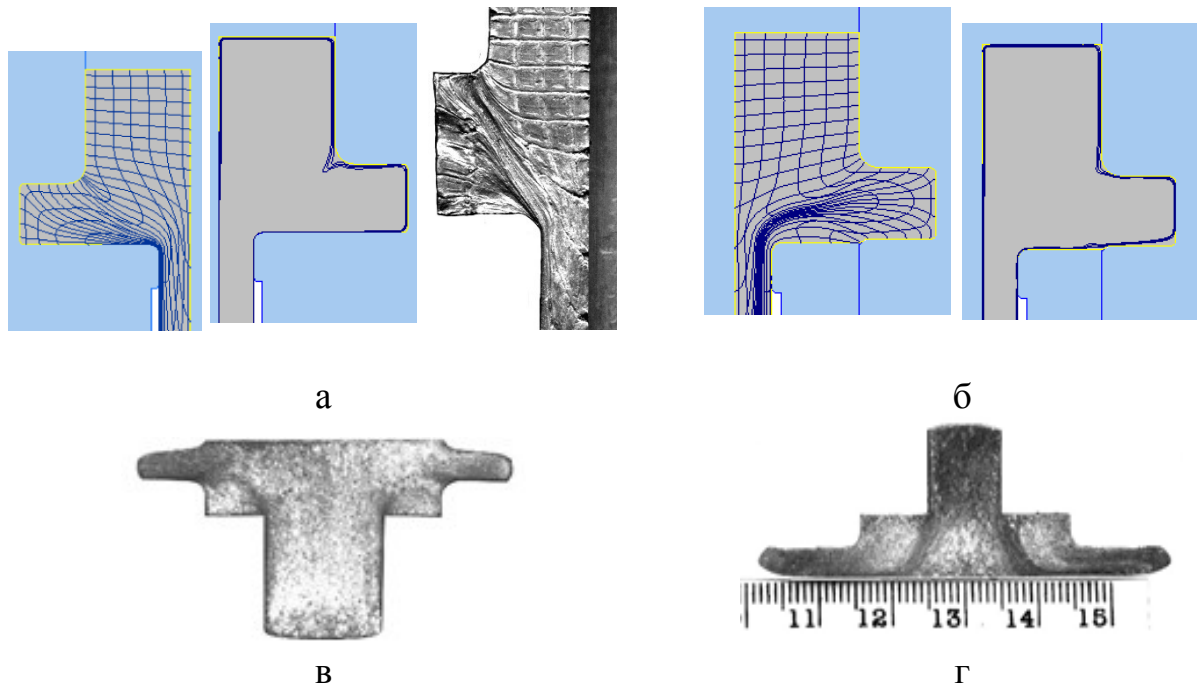


Рис. 1.27. Нерівномірність деформацій при комбінованому радіально-поздовжньому видавлюванні

Для деталей з відростками і фланцями встановлені позитивні можливості схем радіального видавлювання послідовно двосторонньою подачею металу заготовки в порожнину матриці (див. рис. 1.28, схема 2). Для усунення небезпеки руйнування деталі на перехідній до відростка ділянці за рахунок зниження високого градієнта деформацій на границі осередку при одночасному забезпеченні достатньої міцності запропоновано доповнювати одностороннє видавлювання двостороннім видавлюванням на заключній стадії (рис. 1.29, б).

ЛЕКЦІЯ №2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

2.1. Штампування на молотах

Процес штампування на молотах полягає в заповненні деформованим металом порожнин штамів. Порожнини, в яких метал, що знаходиться в пластичному стані, піддається деформації, називаються рівчачками. Рівчак, що представляє собою точний відбиток виготовляється поковки, називається кінцевим рівчачком штампа. Решта рівчаків штампа є допоміжними або заготівельними, які служать для зміни розмірів вихідної заготовки для надання їй оптимальної форми, яка буде сприяти бездефектної її деформації. Кінцевий рівчак як і інші рівчачки, розташовуються зазвичай в двох частинах молотового штампа: у нижній і верхній частини штампа, рис. 2.1. Нижня частина штампа закріплюється через штампотримач в нерухомій частині молота – шаботі, а верхня частина штампа кріпиться в зворотно-поступально рухливій бабі молота.

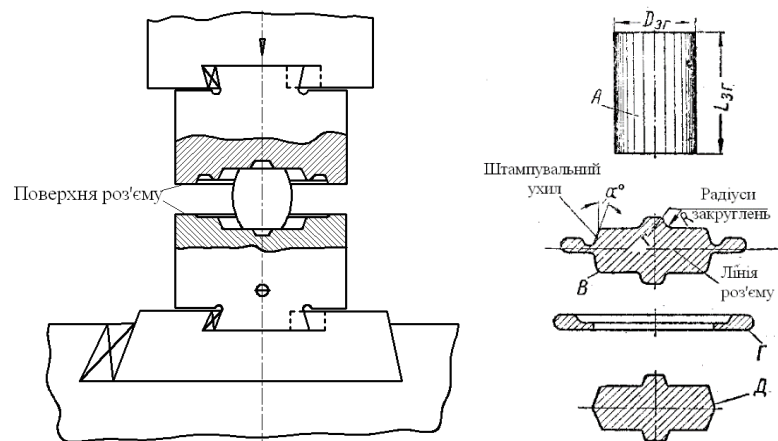


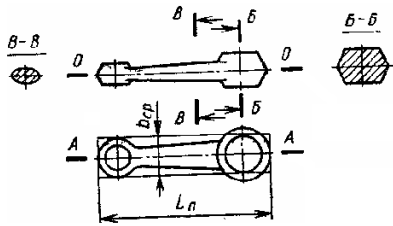
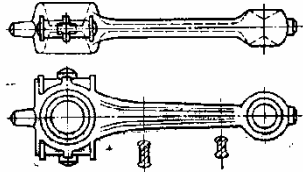
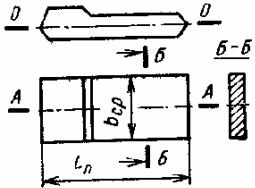
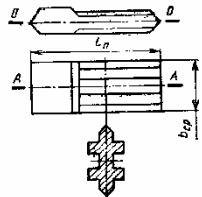
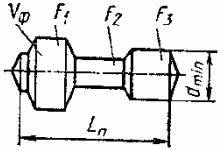
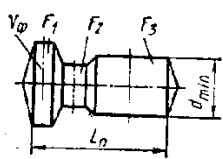
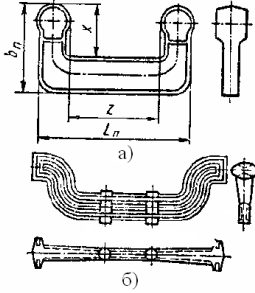
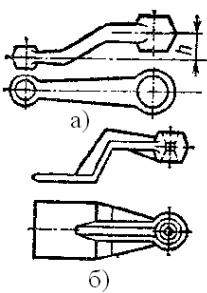
Рис. 2.1. Схема кріплення верхньої і нижньої частини штампа в молоті

Класифікація поковок, що штамуються на молотах, приведена в табл. 2.1.

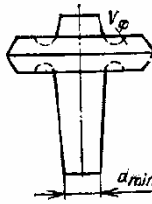
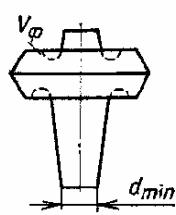
Вихідною інформацією для розроблення креслення поковки є креслення деталі із зазначеними на ньому розмірами, граничними відхиленнями розмірів, шорсткістю поверхонь, маркою матеріалу і установочними базами.

В припусках для подальшої обробки повинні бути враховані: вм'ятини від окалини. Шар знеуглецьованого металу, спотворення форми поверхні і інші можливі дефекти.

Таблиця 2.1 – Класифікація поковок що штамнуються на молотах

Основна характеристика	Тип поковки	
	А	Б
1 група. Поковки, що штамнуються перпендикулярно вісі заготовки.		
1 підгрупа. Із прямою лінією рознімання О-О і прямою подовженою головною віссю А-А. Співвідношення довжини до середньої ширини поковки більше 2.5	<p>З простими поперечними перетинами, що одержують при незначному видавлюванні металу.</p> 	<p>Зі складними поперечними перетинами, що одержують при значному видавлюванні металу.</p> 
2 підгрупа. З прямою лінією рознімання і прямою подовженою головною віссю при відношенні довжини до середньої ширини поковки від 1.5 до 2.5.	Теж що і для першої підгрупи.	
		
3 підгрупа. Подовжені в плані з прямою віссю, мають фланець або бурт, з невеликою різницею в площах поперечних перерізів на інших ділянках поковки.	<p>З фланцем відносно невеликого об'єму.</p> $V_{\phi} > 3 \frac{\pi d_{\min}^3}{4}$ 	<p>З фланцем великого об'єму.</p> $V_{\phi} < 3 \frac{\pi d_{\min}^3}{4}$ 
4 підгрупа. З вигнутою віссю у яких головна вісь або лінія розніму являє собою криву лінію.	<p>З кривою головною віссю.</p> 	<p>З кривою лінією рознімання.</p> 

<p>5 підгрупа. Подовжені з відростками і розвилками з головною віссю, яка на деякій ділянці проходить не по тілу поковки а між її елементами що складають розвилку.</p>	<p>З витягнутою віссю та відростком</p> 	<p>З розвилкою.</p> 
<p>6 підгрупа. Подовжені з комбінованою формою виготовляються з розділенням процесу і комбінуванням агрегатів відповідно до специфіки окремих ділянок поковки.</p>	<p>Виготовляються на штампувальному молоті в поєднанні з пресом або спеціальними машинами.</p> 	<p>Виготовляються на штампувальному молоті в поєднанні з ГКМ.</p> 
<p>2 група. Поковки що штампуються вздовж вісі заготовки.</p>		
<p>1 підгрупа. Круглі і квадратні в плані; типу кілець, втулок, шестерен, круглих фланців.</p>	<p>Круглі що штампуються з переважним осадженням і видавлюванням металу або осадженням і прошиванням з роздачею.</p> 	<p>Квадратні що штампуються з переважним осадженням і видавлюванням металу або осадженням і прошиванням з роздачею.</p> 
<p>2 підгрупа. Типу хрестовин; круглі і квадратні в плані з різно розташованими відростками.</p>	<p>Типу хрестовин з чотирма симетрично розташованими відростками однакової довжини.</p> 	<p>З трьома симетрично розташованими відростками різної довжини</p> 

<p>3 підгрупа. Типу стрижня з фланцем і циліндричним і конічним стрижнем без западин.</p>	<p>З відносно невеликим об'ємом фланця.</p> $V_{\Phi} < 3 \frac{\pi d_{\min}^3}{4}$ 	<p>З відносно великим об'ємом фланця.</p> $V_{\Phi} > 3 \frac{\pi d_{\min}^3}{4}$ 
---	---	---

В допусках враховують недоштампування по висоті, коливання розмірів рівчака штампа в результаті зносу, зсув половин штампа, викривлення і ряд інших чинників.

Припуски і допуски на сталеві поковки призначають по ГОСТ 7505-89.

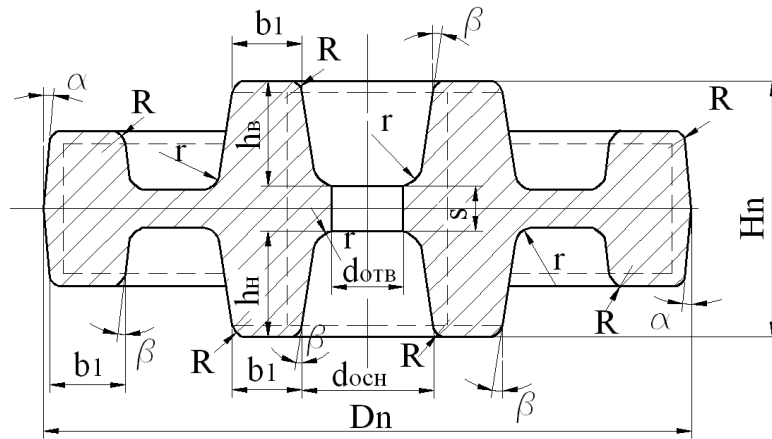
Призначення допусків на розміри поковок, що штампуються в закритих рівчаках осадженням в торець, має ряд особливостей і виконується в наступній послідовності:

- вибирають за ГОСТ 7505-89 допуски на розміри;
- визначають об'єм поковки за максимальними горизонтальним і мінімальним вертикальним її розмірами;
- за об'ємом поковки і з урахуванням угару металу визначають мінімальну довжину заготовки з прокату з урахуванням нижнього відхилення розміру поперечного перерізу;
- встановивши допуск на довжину заготовки, розраховують її максимальний об'єм; в розрахунках довжину і розміри заготовки беруть з позитивними відхиленнями;
- знаходять різницю об'ємів заготовки (мінімального і максимального);
- діленням цієї різниці на площу проекції поковки на площину рознімання, отримують значення відхилень розмірів поковки, від номінальних по висоті, тобто верхні відхилення розмірів, а нижнє відхилення при цьому залишається таким, яким воно передбачено в ГОСТі.

При конструюванні поковок передбачають зовнішні радіуси заокруглень R (рис. 2.2) для запобігання концентрації напружень, розгарних тріщин в кутках гравюри рівчака штампа, зниження зусиль, необхідних для заповнення кутів і забезпечення плавної зміни напрямку волокон. Найменші значення R залежать від маси поковки і глибини порожнини рівчака.

Напуски (внутрішні радіуси заокруглень, напуски на отвори проточки, штампувальні ухили).

Радіуси заокруглення внутрішніх кутів поковки r (див. рис. 2.1) впливають на умови течії металу, стійкість штампа і якість поковок.



R і r – зовнішні і внутрішні радіуси відповідно; α і β – зовнішні і внутрішні штампувальні відхилення відповідно; D_n – діаметр поковки; H_n – висота поковки; h_n і h_a – глибина відповідно нижньої і верхньої намітки під отвір

Рис. 2.2. Креслення поковки

Внутрішні радіуси повинні бути в 3 – 4 рази більше зовнішніх радіусів, в іншому випадку можливе утворення затисків чи перерізів волокон. Величину зовнішніх радіусів закруглень вибирають за ГОСТ 7505-89 в залежності від орієнтовної маси поковки і глибини рівчака штампа.

Для глибоких наміток внутрішній радіус

$$r = 3 + \left(2 + \frac{h}{b}\right) 0.01 D_n ;$$

у всіх інших випадках

$$r = 2.4 + \left(2 + \frac{h}{b}\right) 0.008 D_n .$$

У цих формулах D_n – діаметр поковки, мм.

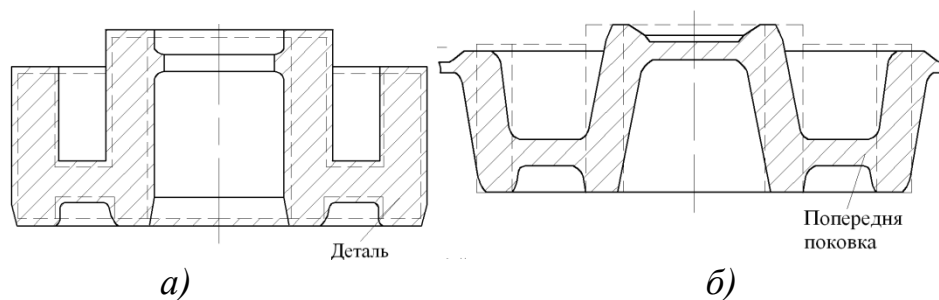
Значення радіусів закруглень рекомендується обирати з ряду: 0.8; 1; 1.5; 2; 2.5; 3. 4. 5. 6. 8. 10. 12.5; 20; 25; 30 і прагнути до їх уніфікації (для однієї поковки), так як це суттєво знижує трудомісткість виготовлення штампа і ріжучого інструменту.

Штампувальні ухили полегшують видалення поковки із рівчака. Ухили α (див. рис. 2.24) призначають на зовнішні поверхні поковки, які при охолодженні відходять від стінок рівчака; ухили β призначають на поверхні, що охоплюють виступаючі частини рівчака. Максимально допустимі штампувальні ухили відповідно до ГОСТ 7505-89 становлять: для зовнішніх поверхонь – 7° і для внутрішніх – 10° . З метою уніфікації ріжучого і вимірювального інструмента значення ухилів рекомендується вибирати з ряду: 1. 3. 5. 7. 10. 12 і 15.

Проектування заглиблень і отворів. Практично можливе отримання наміток отворів (див. рис. 2.2) з діаметром основи

$$d_{очн.min} = 24 + 0.0625 D_n ,$$

де D_n – діаметр поковки, мм.



а – поковка, що спроектована без ухилів; б – поковка, із природними ухілами, що підлягає послідовній правці

Рис. 2.3. Поковка, що штампується без ухилів із послідовним виправленням

Рекомендації по розрахунку вихідної заготовки і переходів штампування поволок різних конфігурацій

При виборі ривчаків молотових штамів рекомендується попередньо вивчити, як штамнують поковки із розподілом металу, аналогічним до даної поковки і такої ж ваги і тільки після цього приступити до вибору ривчаків. Далі необхідно намітити розподіл всіх ривчаків в одному штампі. Якщо всі заготівельні і штампувальні ривчакі не розміщуються в одному штампі, то рекомендується штампувати в двох штампах, що встановлені на рядом стоячих молотах. Бажано здійснювати такий процес при одному нагріванні заготовки і з дотриманням засобів механізації для швидкої передачі заготовки із молота на молот.

Штампування на двох молотах здійснюють також в тому випадку, якщо поковка має складну форму. Тому зсув половини штапу повинен бути мінімальним, а розташування штампувальних ривчаків в двох окремих штампах – центральне.

Поволки 1 групи. 1-а підгрупа. Форма поковки визначає вибір того чи іншого ривчака або комбінації ривчаків. При виборі ривчаків використовують так звану розрахункову заготовку, епюри перетинів розрахункової заготовки і коефіцієнти підкочування.

Побудова розрахункової заготовки і епюри перетинів. Розрахунковою називають умовну заготовку із круглими поперечними перетинами, площі яких дорівнюють сумарній площі відповідних перетинів поковки і облою (рис. 2.4):

$$S_3 = S_{II} + 2 \cdot S_O = S_{II} + 2 \cdot \xi \cdot S_{об.к.}$$

де S_3 – площа поперечного перетину розрахункової заготовки в довільному місці; S_{II} – площа поперечного перерізу поковки в довільному місці, що розрахована за нормальними розмірами із додаванням до вертикальних розмірів половини додатного відхилення; S_O – площа перетину облою; $S_{об.к.}$ – площа перетину облойної канавки, яка встановлюється за табл. 2.1.

Діаметр розрахункової заготовки в будь якому перетині встановлюють із рівняння:

$$\frac{\pi \cdot d_{\text{э}}^2}{4} = S_{\text{э}}; \quad d_{\text{э}} = 1,13 \cdot \sqrt{S_{\text{э}}}.$$

Розраховувавши ряд значень $d_{\text{э}}$ для характерних поперечних перетинів поковки, відкладають відрізки отриманих діаметрів по лініям площин цих перетинів, розподілив їх симетрично по відношенню до вісі і з'єднав послідовно по ділянках прямими лініями характерні точки, отримують кресленик розрахункової заготовки або епюри приведених діаметрів.

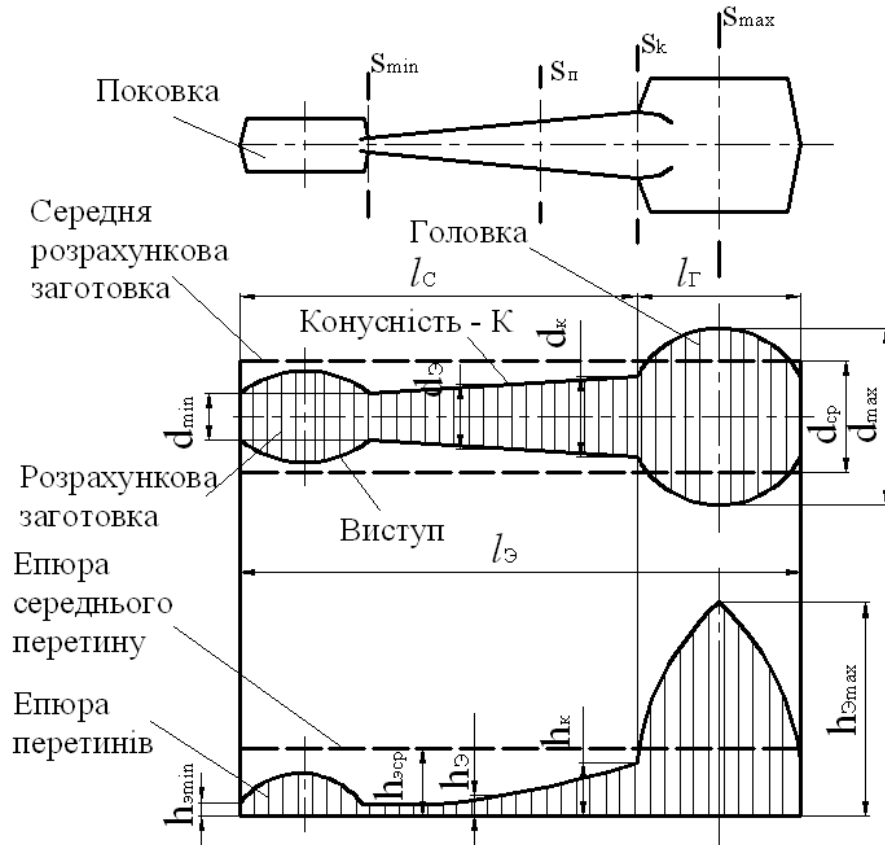


Рис. 2.4. Елементарна розрахункова заготовка і епюра її перетинів (по А.В. Ребельському)

Зображення розрахункової заготовки рекомендується виконувати в масштабі 1:1. Якщо по ординатам відкласти в масштабі M величини площі характерних перетинів $S_{\text{э}}$ в вигляді відрізків, рівних:

$$h_{\text{э}} = \frac{S_{\text{э}}}{M},$$

то, з'єднавши кінці цих відрізків, отримаємо епюру поперечних перетинів розрахункової заготовки. Площі окремих її елементів, помножені на прийнятий масштаб M , являють собою об'єми відповідних елементів розрахункової заготовки:

$$V_x = F_{\text{эx}} \cdot M,$$

де V_x – об'єм любого x -го елемента розрахункової заготовки; $F_{\text{эx}}$ – площа відповідного елемента епюри перетинів.

Об'єм всієї розрахункової заготовки дорівнює:

$$V_{\text{э}} = F_{\text{э}} \cdot M.$$

Середньою розрахунковою заготовкою називають циліндр діаметром d_{cp} , довжиною, яка дорівнює довжині поковки ($l_{\text{э}} = l_n$), і об'ємом $V_{n.\text{об}}$, який дорівнює сумі об'ємів поковки V_n і облою $V_{\text{об}}$:

$$V_{n.\text{об}} = V_n + V_{\text{об}} = V_{\text{э}} = F_{\text{э}} \cdot M.$$

Площа перетину середньої розрахункової заготовки:

$$S_{\text{cp}} = \frac{V_{n.\text{об}}}{l_n} = \frac{V_{\text{э}}}{l_{\text{э}}}.$$

Діаметр середньої розрахункової заготовки

$$d_{\text{cp}} = 1,13 \cdot \sqrt{S_{\text{cp}}}.$$

Об'єм середньої розрахункової заготовки і її діаметр можна також встановити, із використанням епюри поперечних перетинів, попередньо знайшовши її площу $F_{\text{э}}$.

Висота епюри середнього перетину

$$h_{\text{э,ср}} = \frac{F_{\text{э}}}{l_{\text{э}}}.$$

Площа перетину середньої розрахункової заготовки з епюри поперечних перетинів

$$S_{\text{cp}} = h_{\text{э,ср}} \cdot M.$$

При цьому в будь-якому напрямку вісі епюри (за лінією абсцис) прийнято брати масштаб 1:1.

Частина розрахункової заготовки, в межах якої $d_{\text{э}} > d_{\text{cp}}$, називають головою. Частина розрахункової заготовки, в межах якої $d_{\text{э}} < d_{\text{cp}}$, називають стрижнем.

Різниця об'ємів головки V_{Γ} и середньої заготовки в межах головки називають недостатнім об'ємом:

$$v_{\Gamma} = V_{\Gamma} - \frac{\pi \cdot d_{\text{cp}}^2}{4} \cdot l_{\Gamma},$$

де V_{Γ} встановлюють як об'єм тіла обертання.

Різниця об'ємів середньої заготовки в межах стрижня і стрижня називають надлишковим об'ємом:

$$v_{\text{с}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{cp}}^2}{4} \cdot l_{\text{с}} - V_{\text{с}}$$

де $v_{\text{с}}$ встановлюють як об'єм тіла обертання.

Значення $v_{\text{с}}$ іноді зручніше встановлювати через надлишкову площу $f_{\text{с}}$ стрижня епюри:

$$v_{\text{с}} = f_{\text{с}} \cdot M.$$

Якщо головка поковки із отвором або порожниною має на епюрі розрахункової заготовки різку форму, то таку епюру необхідно привести до плавної форми, зберігаючи об'єм незмінним.

2.2. Штампування на КГШП

Поковки, що штамнуються на кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП), розділяють:

в залежності від характеру формоутворення і течії металу при формозміні – на два класи: клас поковок, що одержують з перевагою процесу осадження, і клас поковок, що одержують з перевагою процесу видавлювання;

в залежності від конфігурації та складності виготовлення – на п'ять основних груп (рис. 2.5). Методи виготовлення враховують при виділенні підгруп поковок.

Група	Підгрупа		
	1	2	3
I			
II			
III			
IV			
V			

Рис. 2.5. Класифікація поковок що штамнуються на КГШП

I група – вісесиметричні поковки, виготовлені осадженням в торець або осадженням з одночасним видавлюванням, тобто поковки круглі в плані або близькі до цієї форми, в тому числі квадратні і близькі до круглих і квадратних в плані, а також поковки з відростками. Поковки 1-ї підгрупи штамнують за один перехід, 2-ї і 3-ї підгруп – відповідно за два і три переходи із застосуванням площадки для осадження або заготівельно-підготовчого рівчака. Штампування здійснюють у відкритих і закритих

штампах.

II група – поковки подовженої форми з невеликою різницею в площах поперечних перерізів. Штампування здійснюється, як правило, без попередньої підготовки заготовок. Поковки 1-ї підгрупи штампують за один перехід, 2-ї підгрупи – за два. В поковках третьої підгрупи незначну різницю поперечних перерізів отримують при спарюванні поковок; підготовка заготовок, як правило, не потрібна або ж досить перетискного рівчака; штампування здійснюють за три переходи.

III група – поковки подовженої форми зі значною різницею в площах поперечних перерізів. Для виготовлення цих поковок необхідні заготовки, попередньо оброблені висадженням на ГKM або видавлюванням (1-а підгрупа), згинання на ковальських вальцях або вальцях поперечно-клинової прокатки або на іншому аналогічному обладнанні (2-а підгрупа) і комбінованими процесами (3-а підгрупа). Метал для відростків поковки може бути набраний при місцевому видавлюванні в попередньо-заготівельному рівчаку. При штампуванні поковок з розвилками в попередньому рівчаку застосовують розсікачі.

IV група – поковки із зігнутою віссю. При виготовленні поковок 1-ї підгрупи застосовують штампи з замком; 2-ї підгрупи – згинальні рівчаки, 3-ї підгрупи – штампи з замком і згинальними рівчаками. При штампуванні особливо складних поковок із зігнутою віссю заготовки часто отримують на окремому устаткуванні, а в штампах крім згинальних застосовують всі види рівчаків, у тому числі при необхідності застосовують і розсікачі.

V група – поковки, виготовлені видавлюванням. У поковок типу стрижня з стовщенням (1-а підгрупа) стрижневі елементи утворюються видавлюванням металу в напрямку осі поковки (прямим видавлюванням), а окремі виступи – зворотним видавлюванням (закритою прошивкою). У поковок зі стовщеннями або відростками (2-а підгрупа) видавлювання металу відбувається в напрямках, перпендикулярних до осі поковки, причому видавлювання може бути і комбінованим, тобто разом з поперечним видавлюванням виконують пряме. У поковок з глухою або наскрізною порожниною (3-а підгрупа) порожнисті елементи утворюються видавлюванням металу в замкнуту кільцеву порожнину (заготовки можуть бути суцільними, з отворами і з труб); при виготовленні поковок з порожнинами або виступами з двох сторін застосовують різні матриці і двосторонній рух пуансонів.

При штампуванні на КГШП отримують поковки, більш близькі за формою до готової деталі, більш точні за розмірами, ніж при штампуванні на молотах (рис. 2.6), а також поковки подовженої форми (штампування осадженням в торець; рис. 2.7), причому лінія розніму може бути прийнята більш простою. Це призводить до спрощення конструкцій основного і обрізного штампів. Наявність виштовхувачів дозволяє штампувати в напрямку, паралельному осі повзуна, в результаті чого спрощується конструкція поковки, знижується її маса і зменшується задирок, що, в свою чергу, веде до підвищення коефіцієнта використання металу.

Вибір облойної канавки, розрахунок вихідної заготовки і переходів штампування

Штампування осадженням в відкритих штампах

Об'єм заготовки розраховується за формулою

$$V_{зг} = V_{п} + V_{о} + V_{уг}$$

де $V_{п}$ – об'єм поковки; $V_{уг}$ – втрати на угар; при нагріванні в полум'яних печах з окислювальним нагріванням становлять 2% від маси (об'єму) поковки; для без окислювального нагрівання при утворенні окалини на шляху від нагрівача до пресу втрати на угар можуть бути прийняті рівними 0.7-0.8%; $V_{о}$ – об'єм облою. Об'єм облою при штампуванні на КГШП:

$$V_{о} = V_{мост} + V_{маг} = p (b h_3 + h_2 B)$$

Значення h_3 і b визначаються за табл. 2.2; $h_2 = 2 h_3$. Для поковки масою до 0.5 кг приймають $B = 10$ мм, масою до 2 кг $B = 15$ мм, при масі більше 2 кг $B = 20$ мм. Якщо поковки мають складну форму, а облой утворюється в попередньому штампувальному рівчаку значення B подвоюють.

У табл. 2.2 наведені розміри облойних канавок (рис. 2.6), а також значення радіусів закруглень кромки фігури рівчака в залежності від глибини H порожнини фігури.

На рис. 2.6 наведені чотири типи канавок. Тип I – основний (найбільш поширений). Магазин канавки повністю відкритий з одного боку. Так як нижня половина штампа прогрівається швидше верхньої, то для збільшення стійкості штампу місток (поріг канавки) розташовують у верхній частині штампа.

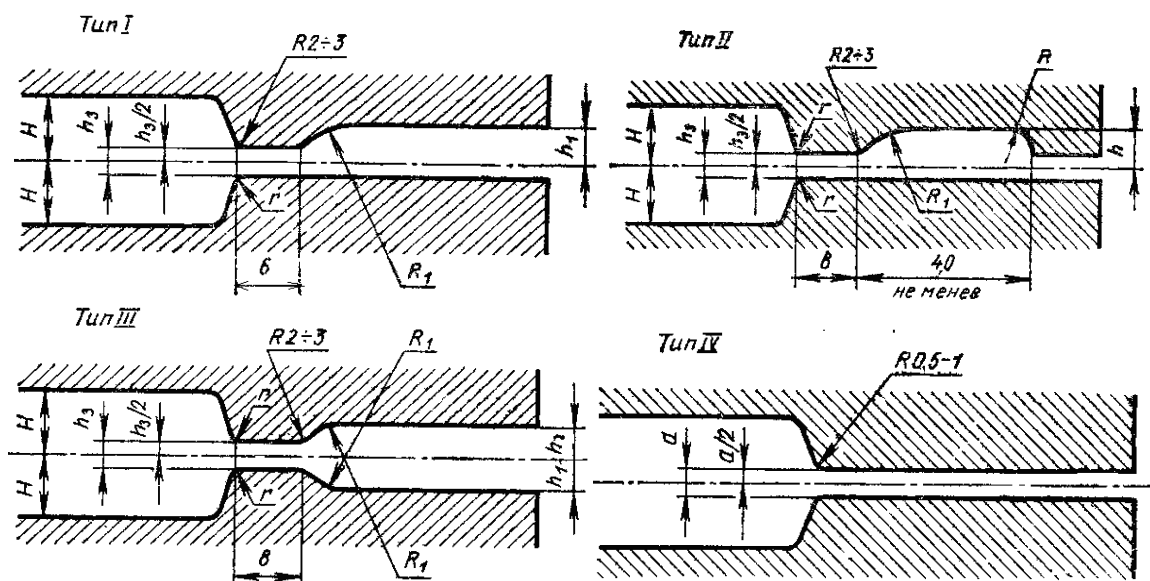


Рис. 2.6. Типи облойних канавок (розміри, мм)

Таблиця 2.2 – Розміри (мм) облойних канавок штампів КГШП

Зусилля пресу, МН	h_0		a		b	h_1	R_1
6.3	1.0-1.5		0.6-1.0		4-5	5	15
10	1.5-2.0		1.0-1.5		4-6	6	15
16	2.0-2.5		1.2-1.6		5-6	6	20
20	2.5-3.0		1.4-1.8		6	6-8	20
25	2.5-3.0		1.6-2.0		6	6-8	20
31.5-40	3.5-4.0		2.0-2.5		6-8	8	25
50-63	4.5-5.0		3.0-3.5		8-12	9-12	30
H	1-3	3-8	8-20	20-30	30-60	60-80	Св. 80
R	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	3.5-4.0	5-6

Тип II – магазин канавки напівзакритий. Такі канавки застосовують для зменшення механічної обробки, якщо кромка рівчака відокремлена від краю вставки.

Тип III – з двостороннім відкритим магазином. Використовують на ділянках рівчака з надмірним витисненням металу в облой.

Тип IV – канавка є гладким зазором. Застосовують у вставках, призначених для гарячого калібрування в тих випадках, коли об'єм облою невеликий.

Креслення епюри діаметрів і перерізів обов'язково, так як це дозволяє визначити, до якої підгрупи віднести поковку і виявити умови підготовки заготовки до штампування. Для спарених і багатоштучних поковок викреслюють загальну епюру для визначення профілю заготовки, яка підготовлюється на інших агрегатах.

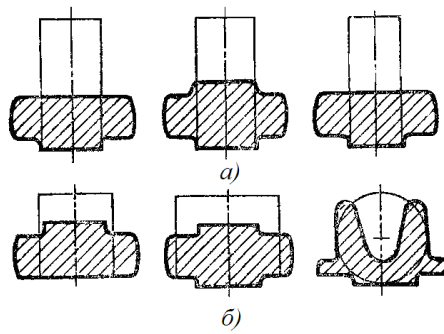
В штампах КГШП застосовують рівчаки (і відповідно переходи): для осадження, перетискні, згинальні, штампувальні заготівельно-попередні, попередні і кінцеві, калібрувальні, правочні; в окремих випадках обрізні і прошивні, іноді підкочувальні.

Поковки I групи. Діаметр заготовки вибирають з урахуванням її зручного укладання в штампувальному рівчаку, забезпечення найкращих умов течії металу і відрізання

Заготовки осаджують на плоских рівчаках або в спеціальних формувальних рівчаках з метою забезпечення фіксації заготовки в штампувальному рівчаку. Якщо діаметр заготовки менше або дорівнює діаметру порожнини для формування, виконують осадження (рис. 2.7. а), якщо діаметр більше діаметра порожнини – осадження з видавлюванням (рис. 2.7. б).

Рекомендуються наступні штампувальні переходи:

штампування в одному кінцевому рівчаку для поковок простої форми з плавними переходами від перетину до перетину, невеликою різницею в діаметрах заготовки і поковки, без виступаючих ребер та бобишок (I-а підгрупа) при нагріванні заготовок з мінімальною окалиною;



a – фасонування з осадженням; б – фасонування з видавлюванням

Рис. 2.7. Схеми фасонування

осадження і кінцеве штампування – поковки нескладної форми при діаметрі заготовки значно менше, ніж діаметр поковки (2-а підгрупа);

попереднє і кінцеве штампування (рис. 2.8) – поковки складної форми при незначній різниці в діаметрах заготовки і поковки;

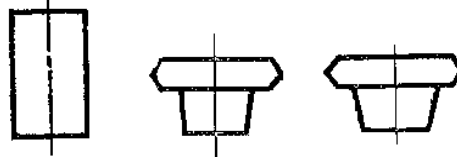


Рис. 2.8. Штампування в попередньому і кінцевому рівчаках

осадження, попереднє і кінцеве штампування (рис. 2.9) – поковки складної форми при значній різниці в діаметрах заготовки і поковки (3-я підгрупа);

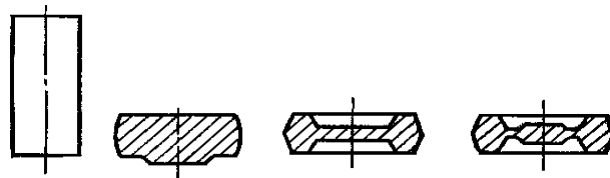
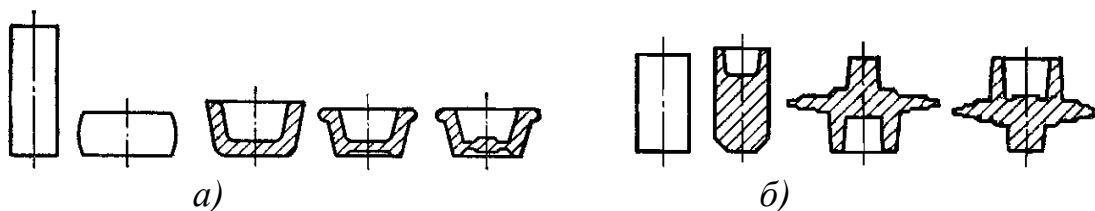


Рис. 2.9. Штампування в трьох рівчаках

осадження, фасонування, попереднє і кінцеве штампування (рис. 2.10) – складні поковки, з глибокими порожнинами або високими виступами.



a – штампування в чотири переходи; б – в три переходи

Рис. 2.10. Багато перехідне штампування

2.3. Штампування на ГKM

Поковки, що виготовляються на ГKM, в залежності від їх форми та технологічних особливостей штампування можна поділити на шість груп.

I група. Поковки типу стрижня із стовщенням.

Розміри поперечного перерізу вихідної заготовки зберігаються в стрижневій частини поковки незмінними.

Формозміна здійснюють висадженням. Крім кінцевого формувального рівчака використовують набірні, попередні формувальні, обрізні і відрізні рівчаки, а також затискові, перетискні і підйомні елементи рівчаків.

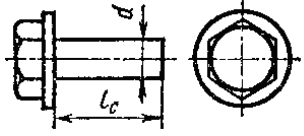
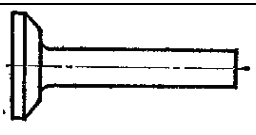
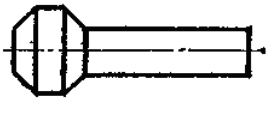
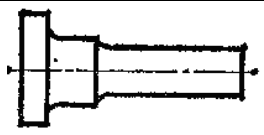
1-а підгрупа. Поковки з одним круглим або складної форми стовщенням на кінці стрижня.

На вибір заготовки впливають діаметр d заготовки і довжина l_c стрижневою частини поковки: при $l_c \leq 1.5d$ використовують пруткову заготовку; при $l_c > 1.5d$ мірну заготовку.

Відрізку поковки від прутка здійснюють зсувом поковки при ході рухомої матриці. Якщо $d > 20$ мм, то відрізання заготовки передуює її перетиск або обрізку проводять в два переходи: надрізання в першому рівчаку і кінцева відрізка у другому.

При штампуванні пруткової заготовки використовують передній упор; при штампуванні мірної заготовки задній упор.

Таблиця 2.3 – Типи поковок

Позначення	Форма стовщення	Особливості штампування	Ескіз
А	Приблизно з постійною площею перетину або збільшується в напрямку від торця до стрижня	Краще розташування формувального рівчак в пуансоні	
Б	Площа поперечного перерізу збільшується в торцевій частині	Формувальні рівчаки розташовані в матрицях	
В	Площа поперечного перерізу збільшується в середній частині	Краще розташування формувального рівчака: частково в матрицях, частково в пуансоні	
Г	Торцевий фланець переходить у стрижня в уступ	Формувальний рівчак розташований частково або повністю в матрицях	

2-а підгрупа. Поковки з двома стовщеннями, розташованими на кінцях стрижня.

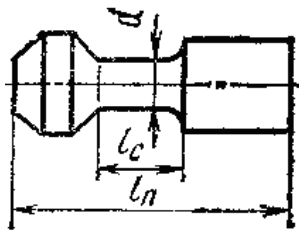


Рис. 2.11. Ескіз типової поковки

Технологічний процес залежить від об'єму стовщень, діаметра d заготовки, довжини стержня l_c поковки і довжини матриць.

Третя підгрупа. Поковки з одним або декількома стовщеннями, розташованими вздовж стрижня.

Уточненню підлягає необхідність використання ковзних матриць, коли довжина ділянки l_1 дозволяє розмістити його в пуансоні

Таблиця 2.4 – Типи поковок

Позначення	Особливість поковки	Особливість штампування	Ескіз
А	Стовщення розташовані на деякій відстані від торця стрижня	Висадження стовщення проводять в пуансоні або матрицях (кінцеву ділянку l_1 розміщують в пуансоні). При $l_1 > d$ ухили рівні $\alpha = 30' \dots 2^\circ$. При наявності двох стовщень штампування здійснюють з поворотом заготовки на 180°	
Б	Стовщення розташовані уздовж стрижня. Ділянки стержня виконані без ухилів	Використовують штампи з ковзними матрицями	

II група. Поковки типу кілець і втулок.

Розміри поперечного перерізу в порівнянні з вихідною заготовкою змінюються на всіх ділянках поковок.

Формозміна поковки здійснюється висадкою і прошивкою, а закінчується операцією пробивання. Найчастіше поковки штампують з пруткових заготовок з використанням переднього упору і відділенням поковки від прутка при пробиванні.

III група. Поковки з порожнинами (глухими отворами).

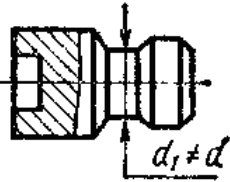
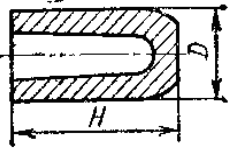
По конфігурації зовнішніх і внутрішніх поверхонь поковки цієї групи аналогічні поковка II групи. У технологічному відношенні вони відрізняються від попередньої групи відсутністю операції пробивання.

Формозміна здійснюють висадженням і прошивкою. Крім кінцевого формувального рівчака можуть бути використані набірні, попередні формувально – прошивні, відрізні і обрізні рівчаки з затисковими, перетискними і відрізними елементами.

1-а підгрупа. Поковки з односторонніми порожнинами.

Штапування проводять з переднім упором в основному від пруткової заготовки. Відділення поковки від прутка здійснюють в відрізнному рівчаку з попередніми перетиском і подальшим зсувом при ході рухомої матриці. Рідше застосовують двох перехідне (і більше) відрізнання в відрізнних вставках штапувальних рівчаків зсувом прутка при ході рухомої матриці.

Таблиця 2.5 – Типи поковок

Позначення	Особливість поковки	Особливість штапування	Ескіз
А	З неглибокою порожниною або без неї, з розмірами поперечних перерізів, що відрізняються від розміру d вихідного прутка	Операції формозміни та штапувальні рівчаки (елементи рівчаків) для поковок цього типу аналогічні операціями формозміни та штапувальним рівчакам (елементам рівчаків) для поковок I групи 1-ї підгрупи. Порожнини отримують прошиванням в поєднанні з висадженням, як і у поковках II групи 1-ї підгрупи	
Б	Гладкі з глибокою порожниною	Особливості штапування аналогічні штапуванню поковок гладких циліндричних втулок (II-2-А). При великій довжині H поковки раціонально вибрати вихідну заготовку на дві поковки і, застосовуючи поступове перетиск прутка, проводити штапування з поворотом. Завдяки перетисканню затискова частина рівчака має мінімальну довжину, рівну $(1 \dots 1.5) d$.	

IV група. Порожні поковки, що штапуються з труб.

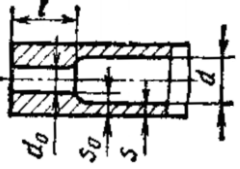

До цієї групи відносять поковки, розміри поперечних перерізів яких

змінюються переважно на кінцевих ділянках труби. Стовщення в середній частині труби отримують так само, як у поковках І групи 3-ї підгрупи.

1-а підгрупа. Поковки зі стовщеною стінкою.

Стовщення стінки здійснюють висадженням з подальшим її стоншенням в тому випадку, якщо формозміна стовщення завершується роздачею

Таблиця 2.6 – Типи поковок

Позначення	Особливість поковки	Особливість штампування	Ескіз
А	Зі зменшеним внутрішнім діаметром труби	Форма стовщення зручна для набору металу, що здійснюється висадженням. При великій довжині частини l що висаджується в першому переході збільшують товщину стінки s до $0.75 s_0$ і в другому – до s_0 . Таке ведення процесу запобігає утворенню поздовжньої і торцевої задирок і сприяє кращому видаленню окалини	
Б	Зі збільшеним зовнішнім діаметром труби	<p>Форма стовщення менш зручна для набору металу висадженням в порівнянні з попередньою поковкою. За один перехід можна отримати стовщення з товщиною стінки $s_0 \leq 1.25s$. При $l \leq 0.75D$ і $D_0 \leq \sqrt{D^2 + 0.75d^2}$ можна проводити стовщення стінки в два переходи. У першому переході здійснюють висадження зі зменшенням внутрішнього діаметра труби не більше ніж в 2 рази, у другому роздачу труби до первісного внутрішнього діаметра і необхідного зовнішнього.</p> <p>При $l > 0.75D$ і $D_0 \leq \sqrt{D^2 + 0.75d^2}$ висадження проводять в три переходи з двома-трьома нагріваннями. У перших двох переходах висаджують метал труби із зменшенням її внутрішнього діаметра і в третьому переході проводять роздачу.</p> <p>При $l = (1..2.5)D$ і $D_0 = (1.5..2)D$ висадження виконують в чотири переходи. У першому переході висаджують метал всередину труби зі зменшенням d на 25%, у другому одночасно всередину і назовні зі зменшенням d на 50%, у третьому переході висаджують метал із збільшенням зовнішнього діаметра.</p>	

Висадження в конічну порожнину. Розрахунок розмірів набірних переходів.

Для першого набірного переходу ($k=1$)

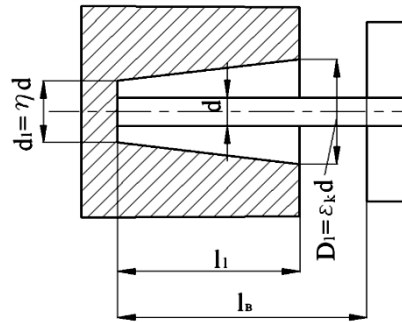


Рис. 2.7. Схема першого набірного переходу

Діаметр меншої основи

$$d_1 = d \cdot \eta_1;$$

$$\eta_k = 1.05 + 0.05 \cdot (k - 1),$$

де k – номер набірний переходу

Діаметр більшої основи

$$D_k = d \cdot \varepsilon_1;$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_1 = 1.74 - 0.02 \cdot \sqrt{(35 - [\psi])^2 - (35 - \psi)^2}.$$

Довжина конічного стовщення

$$l_b = \frac{3.82 \cdot u \cdot V_b}{D_1^2 + d_1^2 + D_1 d_1},$$

де u – коефіцієнт запасу простору (табл. 3.16), V_b – об'єм частини прутка що висаджується.

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнту u

Номер переходу	Вихідний діаметр, мм			
	< 20	> 20 < 40	> 40 < 60	> 60 < 80
1	1.07	1.09	1.11	1.13
2	1.05	1.06	1.08	1.09
3	1.04	1.05	1.07	1.08
4	1.03	1.04	1.05	1.06
5	1.02	1.03	1.04	1.08

Для другого, третього і k -го переходів

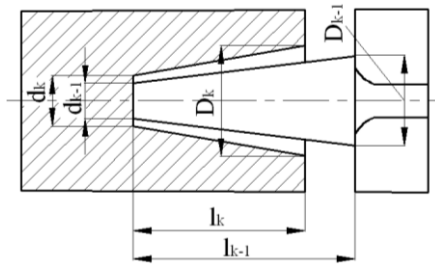


Рис. 2.8. Схема k -го набірною переходу

$$d_{(k-1)cp} = \frac{D_{(k-1)} + d_{(k-1)}}{2};$$

$$[\psi_{(k-1)}] = 2 + 0.01 \cdot d_{(k-1)cp};$$

$$\psi_{(k-1)} = \frac{l_{(k-1)}}{d_{(k-1)cp}}.$$

Якщо $\psi_{(k-1)} > [\psi_{(k-1)}]$, то необхідний k -й набір.

Діаметр меншої основи

$$d_k = d_{k-1} \cdot \eta_k;$$

$$\eta_k = 1.05 + 0.05 \cdot (k - 1).$$

Діаметр більшої основи

$$D_k = d_{(k-1)cp} \cdot \varepsilon_k;$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_1 = 1.74 - 0.02 \cdot \sqrt{(35 - [\psi_{(k-1)}])^2 - (35 - \psi_{(k-1)})^2}.$$

Довжина кінцевого стовщення

$$l_k = \frac{3.82 \cdot u \cdot V_b}{D_k^2 + d_k^2 + D_k d_k},$$

де u – коефіцієнт запасу простору.

Якщо поковка має складну форму то розрахунок необхідно вести за розрахунковим конусом або розрахунковому циліндру.

ЛЕКЦІЯ №3 РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ КУВАННЯ

3.1. Операції кування

3.1.1. Білетування (обкатування) злитка

У технологічних процесах кування злитків часто основним деформуючим операціям передують білетування. Ця операція розглядається як фактор, що забезпечує підвищення механічних властивостей поверхневих шарів литого сталевих злитка і тим самим зменшує імовірність виникнення поверхневих тріщин на наступних операціях. Крім того, вважається, що обтиснення ребер попереджає швидке їхнє охолодження у порівнянні з тілом злитка. Ця операція полягає в обтисненні багатогранного злитка й одержанні з нього заготовки круглого перетину діаметром вписаної окружності нижнього перетину злитка. У таблиці 3.1 показаний рівень механічних властивостей металу з білетуванням і без нього.

Таблиця 3.1 - Механічні властивості поверхневих шарів металу (сталь 45 зі злитка масою 20 т до й після білетування)

Напрямок по відношенню до осі злитка	Вид обробки	Властивості			
		σ_B , МПа	ψ , %	δ , %	КСУ, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$
Уздовж	Литий метал	560	51,7	26,0	510
	Після білетування	555	51,7	20,5	540
Поперек	Литий метал	585	47,0	20,0	410
	Після білетування	560	50,5	23,0	490

Білетування злитків є обов'язковим при куванні поковок типу кілець, циліндрів і дисків. У цих випадках необхідно забезпечити точне дозування об'єму металу у вихідному блоці. Вирубати точно необхідний об'єм металу з конусного злитка складно. Тому його потрібно збілетувати до циліндричної форми і обрубати в міру. Перед операцією білетування здійснюється відтягнення цапфи під патрон або захват маніпулятора. Звичайно цапфу кують із прибуткової частини злитка, що повинна видалятися у відхід. Рідко по технологічних міркуваннях цапфа відтягається з донної частини злитка, але це веде до збільшення відходів металу. Діаметр цапфи повинен бути таким, щоб забезпечити надійне втримання злитка під час кування. На рис. 3.1 наведена крива, що відбиває залежність необхідного діаметра цапфи для втримання злитків різної маси. Діаметр цапфи d приблизно можна визначити зі співвідношення

$$d = (0,45 - 0,60)D_{cp}, \quad (3.1)$$

де D_{cp} – середній діаметр злитка.

Довжина цапфи $l_{ц} \geq 1,5d_{ц}$. При зазначених співвідношеннях діаметрів біля одного відсотка осадженого об'єму металу затікає в отвір плити для осадження.

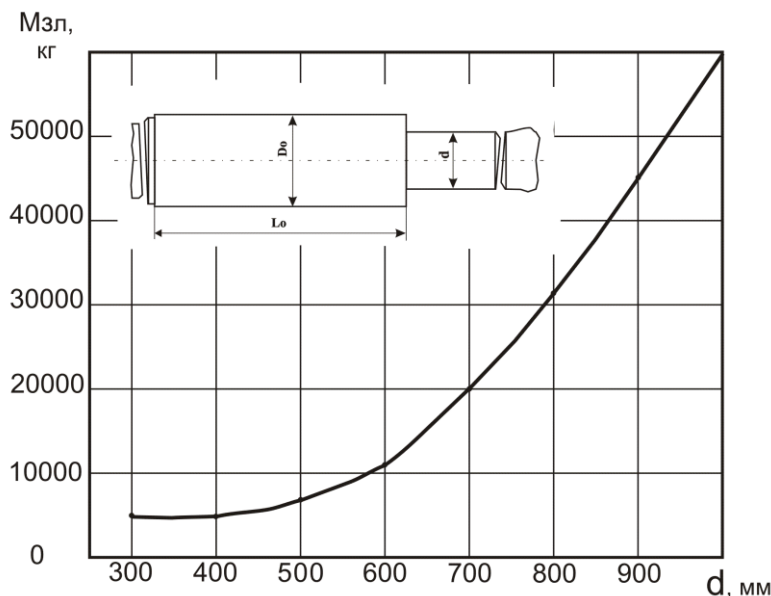


Рис. 3.1. Крива залежності діаметра цапфи від маси злитка

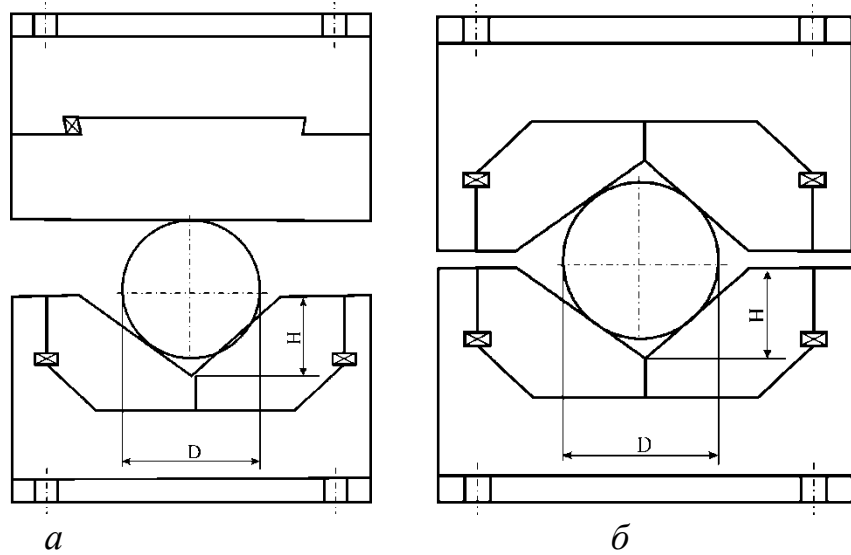
Обкатування проводять звичайно в комбінованих або вирізних бойках (рис. 3.2) у такій послідовності. Спочатку із прибутку відтягають цапфу $d_{ц}$ і рубають по довжині в міру $L_{ц}$ (рис. 3.3). Потім кантують, утримуючи за цапфу, обжимають корпус злитка на діаметр вписаної окружності донної частини $D_{б}$. При цьому уков становить: $y=1,05...1,2$. Перевага віддається комбінованим бойкам, тому що в цьому випадку відпадає необхідність міняти верхній бойок для наступного кування. Після цього рубають донну частину і одержують вихідний розмір білету по довжині $L_{б}$. З метою збільшення укову після осадження в окремих частинах недокова застосовується білетування на «опуклу бочку» або «увігнуту бочку» (рис. 3.4).

Спеціальні високолеговані сталі не білетують, тому що вони мають дуже низьку пластичність. Злитки таких сталей спочатку пресують для збільшення пластичності в умовах жорсткої схеми об'ємно-напруженого стану стиснення, а потім куять.

3.1.2. Осадження

Осадження – це така технологічна операція, при якій відбувається зменшення висоти заготовки та збільшенні площі її поперечного перерізу. Цю технологічну операцію застосовують для збільшення поперечного перерізу заготовки або злитка, якщо його перетин не забезпечує достатнього

укова.



a

б

a - бойки комбіновані; б - бойки вирізні

Рис. 3.2. Обкатування злитка й кування цапфи

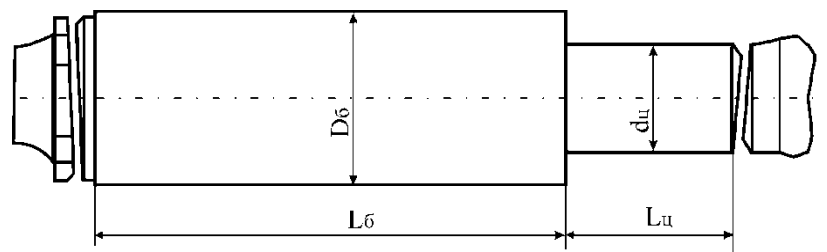
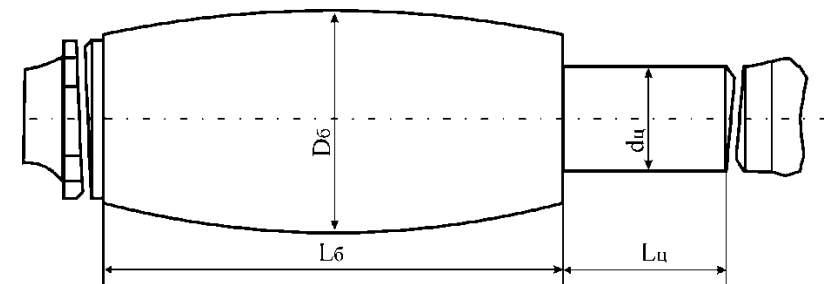
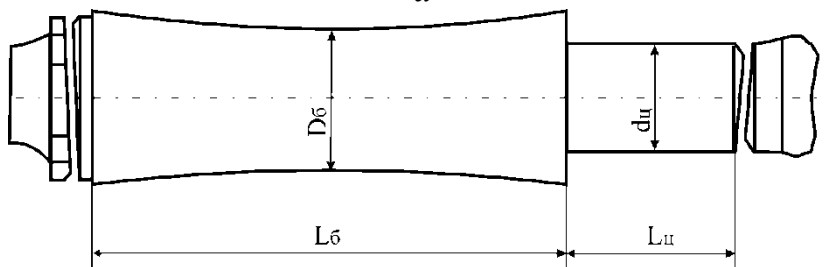


Рис. 3.3. Обкатаний злиток



a



б

a - білетування на «опуклу бочку»; б - білетування на «увігнуту бочку»

Рис. 3.4. Білетування на «опуклу» і «увігнуту» бочку

А також для підвищення механічних властивостей металу й заварки

внутрішніх дефектів, для одержання поковок із малим співвідношенням H/D , тобто поковок типу дисків, і як операцію, що передує прошиванню.

У першому випадку, якщо поперечний переріз обраного за масою злитка не забезпечує необхідного по технологічних умовах укову, роблять осадження до необхідного розміру (рис. 3.5). На рис. 3.4 наведена узагальнена залежність зміни механічних властивостей металу поковок від розміру укову.

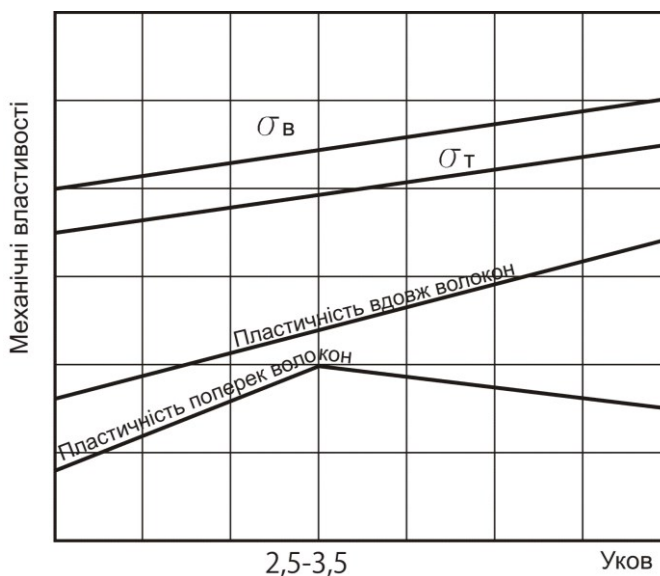
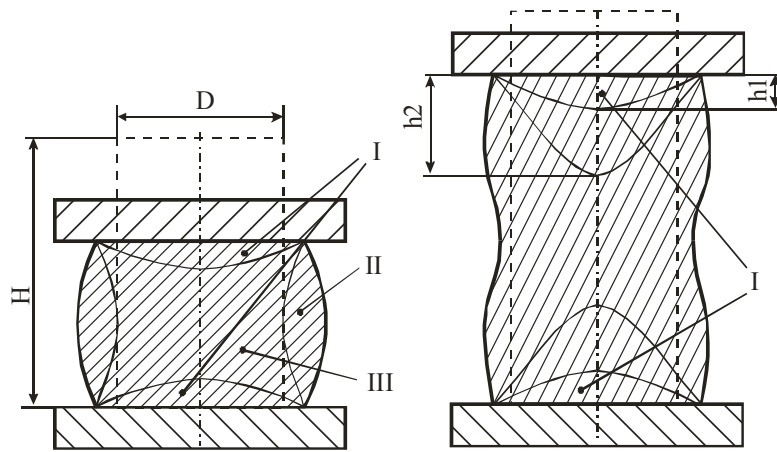


Рис. 3.5. Залежність механічних властивостей металу від укову

У загальному випадку характеристики міцності металу (σ_B , σ_T) збільшуються з ростом укову але незначно ($\sim 5-10\%$). В основному змінюються пластичні властивості: вони збільшуються з ростом укову уздовж волокна, поперек волокна - спочатку збільшуються, а потім знижуються. Найменша різниця в цих властивостях спостерігається в інтервалі укову 2,5...3,5. Отже, при необхідності одержання рівномірності у всіх напрямках поковки уков потрібно призначати в межах 3. Для підвищення властивостей тільки в одному напрямку уков для вуглецевих сталей раціональний до 10, коли по всьому об'ємі поковки спостерігається утворення волокнистості. Для легованих марок сталі величина укову залежить від складу сталі і вибирається індивідуально.

Осадження з метою забезпечення потрібних механічних властивостей і заварювання дефектів має цілий ряд особливостей. Частіше проводять однократне осадження, рідше - дворазове. Варто мати на увазі, що осадження по висоті менш ніж на 50% не робить істотного впливу на властивості поковок. Необхідно враховувати нерівномірність деформації при осадженні. З теорії обробки металів тиском відомо, що в осаджуваній заготовці виникають три характерні зони (рис. 3.6), в яких вплив деформації на заварювання дефектів буде різним.



I - зона ускладненої деформації; II - зона середньої деформації; III - зона інтенсивної деформації

$$h_1 = D/3; \quad h_2 = \frac{3}{4}D$$

Рис. 3.6. Зони деформації при осадженні

Рис. 3.7. Утворення подвійної бочки при осадженні

Щоб уникнути появи поздовжнього вигину, гранична висота заготовки повинна бути $H \leq 2,5D$. В загальному випадку осадження високих заготовок протікає в три стадії. На першій стадії при досить великій висоті $\left(\frac{D}{H} \leq 0,4 \dots 0,5\right)$ відбувається подвійне бочкоутворення (рис. 3.6). Деформація зосереджується біля зон ускладненої деформації (зона I), які як би розклинають метал ($h_2 \geq h_1$ на рис. 3.6).

Метал тече в радіальному напрямку, і бічні поверхні переходять на торцеві. Друга стадія характеризується зближенням зон ускладненої деформації до моменту їхньої взаємодії $\left(\frac{D}{H} \leq 2 \dots 4\right)$. Деформація поширюється на весь об'єм, починається ковзання металу по контактних поверхнях. З'являється бочкоподібність, і схема розподілу деформації відповідає тій, котра показана на рис. 3.5. На третій стадії $\left(\frac{D}{H} \geq 2 \dots 4\right)$ починається взаємодія зон ускладненої деформації і різко зростає зусилля, необхідне для осадження.

При цьому, чим більші сили тертя на контактних поверхнях, тим менше відношення D/H , що визначає перехід від однієї стадії до іншої. Закриття дефектів при осадженні залежить від розподілу деформації по об'єму осаджуваної заготовки. За даними В. М. Трубіна, при $H/D=1$ дефекти, відносна висота яких $h_d/X=0,09$, закриваються, якщо місцева деформація досягає 60%, а при $H/D=2,2$ закриття відбувається при місцевій деформації 60...65% (рис. 3.8, а).

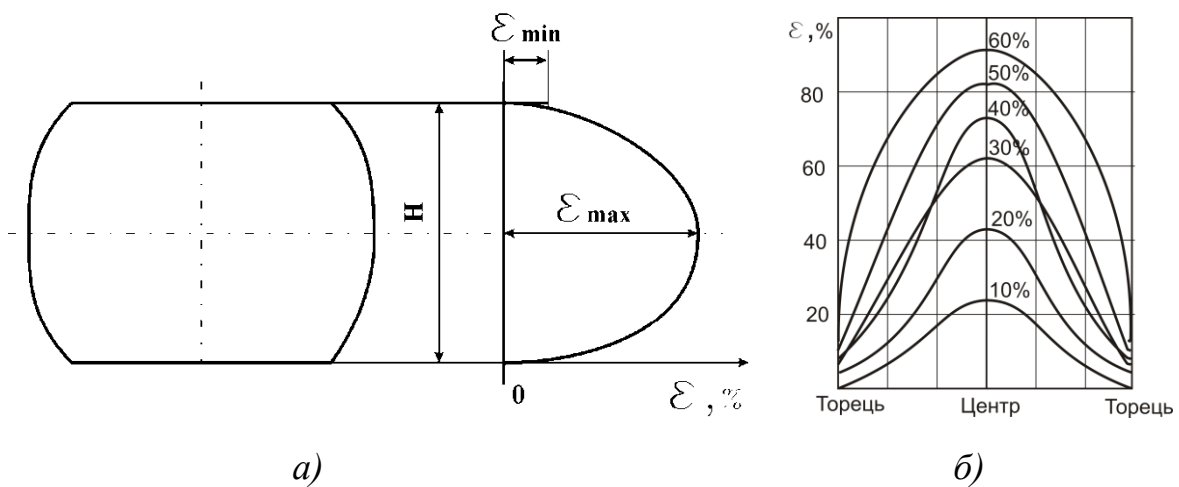
Про характер розподілу місцевої деформації по осі зразка при осадженні можна судити за експериментальними даними І. М. Павлова (рис. 3.8, б). Зі збільшенням загального ступеня деформування зразка різниця

місцевих деформацій у торцевих поверхнях і в центрі зростає. Так, наприклад, при середній відносній деформації зразка 60% у зонах I (див. рис. 3.5) метал деформований на величину близько 10%, а в центрі зони III деформація становить більше 90%.

Тому ступінь закриття дефектів по об'єму заготовки, яку осаджують, залежно від місця їхнього розташування буде різною. Відповідно до нерівномірності деформації проявляється нерівномірність закриття дефектів. Вона залежить не тільки від розміру деформованого тіла, але й від його температури, умов тертя й ступеня деформації.

Різновидом операції осадження є осадження із хвостовиком або двома хвостовиками (рис. 3.8). Величина затікання металу в отвір підкладної плити залежить від співвідношення розмірів заготовки, форми отвору і ступеня відносної деформації.

В. І. Трубін встановив три схеми плинину металу. Перша схема (рис. 3.9, а) можлива при порівняно високій заготовці ($H/D > 0,25$), коли отвір в кільці мало впливає на формозміну й розподіл деформації. Відбувається радіальний зсув металу до периферії. Осьова частина заготовки, що примикає до отвору кільця, майже не деформується. Зсув деякого об'єму металу в кільце відбувається в результаті дії сил зрізу. Тому абсолютне збільшення довжини цапфи, яка утворюється $\Delta l_{\text{ц}}$, менше абсолютного обтиснення ΔH . При відношенні $H/D \approx 0,25$ метал тече по другій схемі (рис. 3.9, б). Центральна зона металу (А) спрямовується в кільце, а в іншій частині (Б) відбувається радіальний плин. У цьому випадку збільшення цапфи дорівнює абсолютному обтисненню заготовки ($\Delta l_{\text{ц}} = \Delta H$). Третя схема ($H/D < 0,25$) характеризується тим, що по контактній поверхні виникають значні сили тертя й відповідно до закону найменшого опору частина металу переміщається в радіальному напрямку, а інша тече в кільце (рис. 3.9, в). Збільшення довжини цапфи перевищує абсолютне обтиснення ($\Delta l_{\text{ц}} > \Delta H$).



а - схема осадження; б - графічна залежність

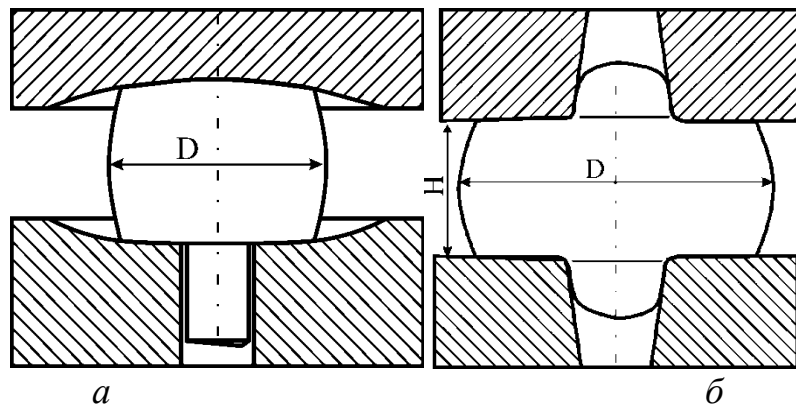
Рис. 3.8. Характер нерівномірності деформації по осі заготовки при осадженні

Отже, для інтенсивного переміщення металу в кільце потрібно, щоб висота деформованої заготовки досягла значення $H < (0,25 \dots 0,35)D$. На рис. 3.10 наведені графіки, що описують зміну інтенсивності плинності металу в отвір підкладної плити залежно від відношення вихідних розмірів H_0 і D_0 заготовки, яку осаджують, і відносної деформації. Абсолютні значення переміщень у реальних умовах будуть дещо відрізнятися через різні коефіцієнти тертя, інтенсивність охолодження, швидкість деформації тощо.

Для одержання поковок типу дисків (з більшим співвідношенням D/H) операція осадження є остаточною, визначальною властивості поковки. Головні напрямки робочих напружень у деталях, виготовлених з поковок дисків, збігаються з орієнтуванням волокон поковок (радіальним і тангенціальним напрямками). Для заготовок, які одержали з малих злитків масою до 2,2 т і висотою маточини 200 мм, підвищення пластичності в зазначених напрямках спостерігається при деформуванні до моменту трикратного зменшення висоти злитка.

Подальше збільшення деформації не приводить до помітних змін цих властивостей. Для поковок дисків зі злитків масою 2,2...5,7 т і висотою маточини 300...360 мм варто вважати оптимальним осадження зі зменшенням висоти в 4 рази.

Для подовжених злитків при осадженні досить дворазового обтиснення по висоті. При малих деформаціях (зменшенні висоти в 1,5...2,5 рази) помітний вплив на механічні властивості поковок робить проміжне осадження. Заготовку осаджують, потім простягають і осаджують до остаточного розміру. Цим забезпечують високий рівень і більшу однорідність механічних властивостей по всьому об'єму поковки.

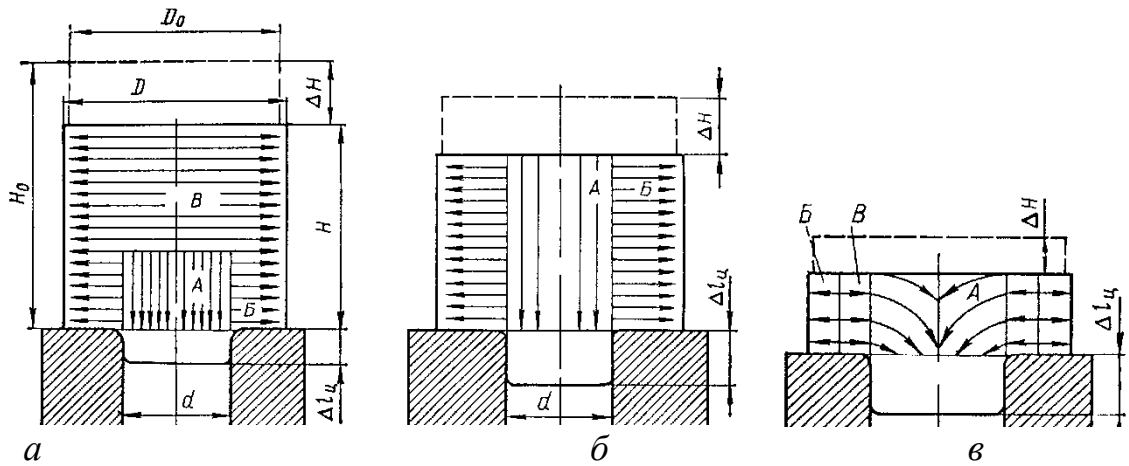


а - осадження із хвостовиком; б - осадження кільцевими плитами

Рис. 3.9. Різновиди операції осадження

Осадження малих заготовок із прокату роблять, як правило, на плоских бойках. Для осадження злитків застосовують спеціальні осадочні плити, які виготовляють кованими або литими зі середньовуглецевої сталі.

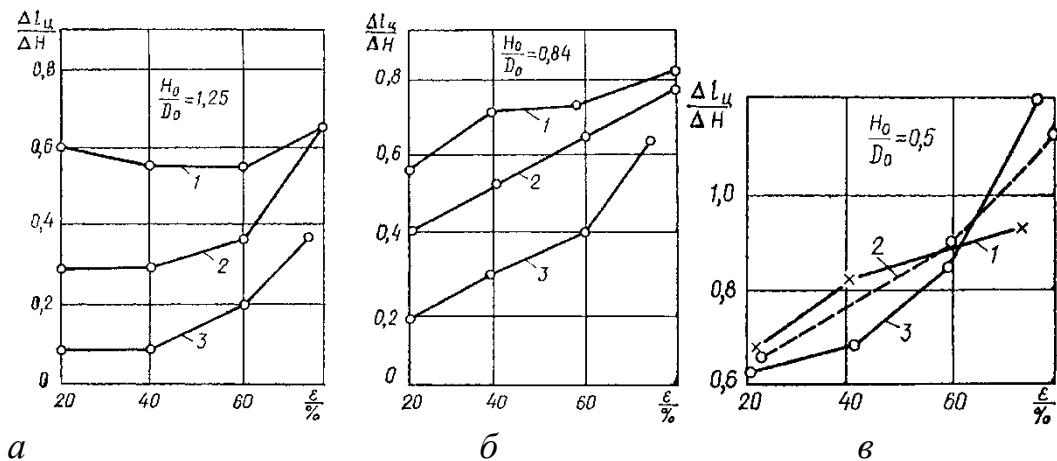
Осадочні плити бувають плоскі і сферичної форми. Зовнішній діаметр плити вибирають рівним $D = (1,2 \dots 1,5)D_1$, де D_1 – діаметр злитка після осадження, висота $H = (0,25 \dots 0,35)D$.



$a - (H/D > 0,25); \quad б - (H/D) \approx 0,25; \quad в - (H/D < 0,25)$

Рис. 3.10. Плин металу при осадженні заготовок на підкладному кільці

Для сферичних плит радіус виїмки $r=(2,0...2,5)D$, глибина виїмки $h=(0,1...0,2)H$. Сферичні плити збільшують нерівномірність деформації при осадженні за рахунок збільшення зон ускладненої деформації. У цьому випадку центральна зона по висоті буде мати більшу місцеву деформацію. Торцеві частини осадженої заготовки виходять опуклими. При подальшій протяжці, коли периферійні шари поковки подовжуються більш інтенсивно, ніж центральні, відбувається вирівнювання торцевих частин і не утворюються утяжини по осі поковки, що зменшує кінцеві відходи. Сферичні плити також забезпечують стійке положення злитка під час осадження. Тому їх застосовують частіше, ніж плоскі (осадження між двома плоскими плитамі найчастіше застосовують перед прошиванням). У нижніх осадкових плитах роблять отвори для розміщення цапф, необхідних для втримання заготовки.



$a - H_0/D_0=1,25; \quad б - H_0/D_0=0,84;$

$в - H_0/D_0=0,5; \quad 1 - \frac{d}{D_0} = 0,86; \quad 2 - \frac{d}{D_0} = 0,64; \quad 3 - \frac{d}{D_0} = 0,43$

Рис. 3.11. Зміна збільшення відносної довжини цапфи $\Delta L_{ц} > \Delta H$ залежно від ступеня деформації осаджуваних заготовок

Із загальноприйнятих правил осадження вважається, що кругла заготовка (білет) для виключення поздовжнього вигину повинна мати відношення $H/D \leq 2,5 \dots 3,0$. При осадженні заготовки прямокутного перетину необхідно мати $H/a \leq 3,5 \dots 4,0$ (рис. 3.12).

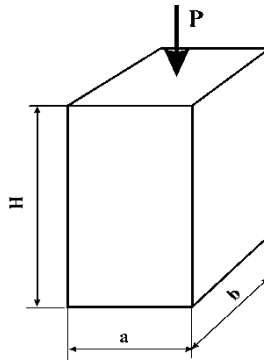


Рис. 3.12. Осадження заготовок прямокутного перетину

3.1.3. Протяжка

Основною формотворною операцією кування є протяжка ковальська (надалі опустимо слово «ковальська»). Під протяжкою розуміють операцію, при якій відбувається подовження заготовки або її частини (зменшується площа поперечного перерізу). Застосовують її після осадження при куванні поковок із подовженою віссю типу валів, плит тощо або як самостійну формотворну операцію, якщо після її виконання досягають необхідного укову.

Протяжку здійснюють послідовними обтисненнями суміжних ділянок заготовки з кантуванням або без нього.

При протяжці розрізняють ходи, проходи і переходи. Під ходом розуміють одиничне обтиснення заготовки, при якому відбувається лише локальна деформація її ділянки. Проходом називається сукупність послідовних однакових ходів, у результаті яких здійснюється деформація частини (або всієї) заготовки при її плоскопаралельному переміщенні. Переходом називається сукупність проходів, яка забезпечує одержання нової конфігурації поперечного перерізу заготовки на всій довжині (або оброблюваній ділянці) заготовки.

Протяжку роблять бойками різної форми: плоскими, комбінованими й вирізними. Протяжку здійснюють «проходами», «кільцями», «по гвинту». Протяжку «проходами» виконують шляхом послідовних подач і обтиснень кування по всій її довжині без проміжних кантувань (подача → обтиснення → подача → обтиснення і т.д.). Протяжка «кільцями» являє собою процес обтиснення поковки по периметру на заданий розмір в одному якому-небудь її місці без проміжних подач (обтиснення → кантування → обтиснення → кантування і т.д.). Протяжка «по гвинту» характеризуються чергуванням подач, обтиснень і кантувань (подача → обтиснення → кантування → подача і т.д.). При куванні плоскими бойками ці способи протяжки схематично

представлені на рис. 3.12. До основних параметрів протяжки відносяться уков і подача. Для плоских бойків величина укову або відносна зміна площі поперечного перерізу за обтиснення залежить від співвідношення між подовженням і розширенням. Уков визначають за формулою Є. П. Унксова:

$$Y = \frac{1}{[1 - \varepsilon_H(1 - f)]}, \quad (3.2)$$

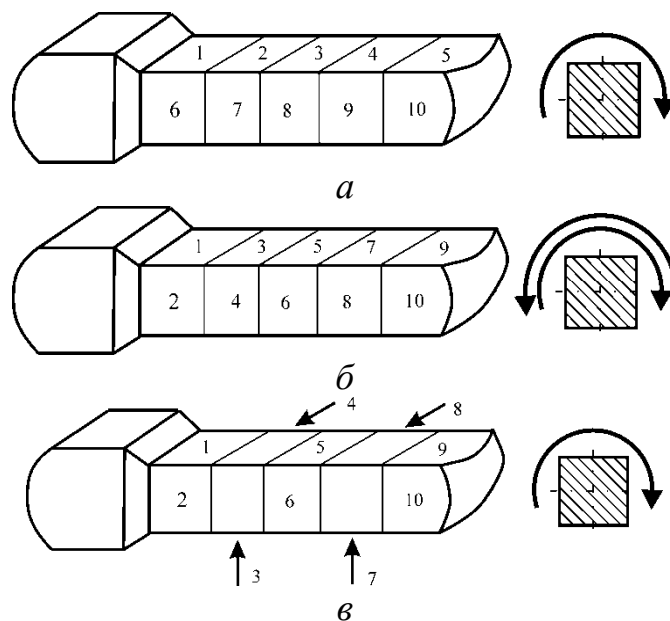
де ε_H - деформація за обтиснення;

f – коефіцієнт інтенсивності розширення.

Деформацію за обтиснення обирають залежно від марки матеріалу. Звичайно вона перебуває в межах 0,1...0,3.

Коефіцієнт інтенсивності розширення f залежить від співвідношення подачі L і ширини заготовки B (рис. 3.13, з).

Чим менше подача, тим менше розширення та інтенсивніше подовження. Протяжка з невеликими подачами приводять до збільшення числа обтиснень і, отже, до зниження продуктивності. При роботі з малими подачами і більшими обтисненнями можливе утворення затисків (рис. 3.13, д). У цьому випадку необхідно дотримувати співвідношення $L = \frac{\Delta H}{2}$. На практиці подачу звичайно приймають у межах $L = (0,5...0,8)B$.



а - протяжка «проходами»; б - протяжка «кільцями»; в - протяжка «по гвинту»; з - схема протяжки; д - механізм утворення затисків

Рис. 3.13. Способи протяжки плоскими бойками

При встановленні форми й типу бойків виходять із необхідної інтенсивності протяжка або продуктивності кування, можливості забезпечення необхідного укова й потрібної схеми напруженого стану, від чого залежить пластичність сталі.

При застосуванні плоских бойків об'ємно-напружений стан досягається за рахунок тиску бойків R і сил тертя між деформуємим металом і бойками в напрямку витяжки T_x і розширення T_y (рис. 3.14).

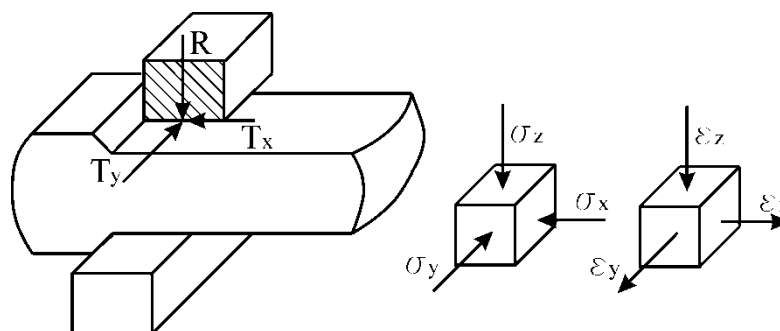


Рис. 3.14. Напружено-деформований стан при протяжці плоскими бойками

У випадку застосування опуклих бойків реакція сил тертя T_x спрямована убік, зворотній R_x (рис. 3.15). Таким чином, сили тертя в напрямку витягування послабляються або ліквідуються складовою R_x . Тому протяжка опуклими бойками більш інтенсивне, а розширення поковки різко зменшується. Опуклі бойки не рекомендуються при куванні малопластичних сплавів, тому що у зв'язку з менш жорсткою схемою об'ємно-напруженого стану можлива поява руйнувань деформуємої заготовки через інтенсивне подовження.

Кування у вирізних бойках обмежує розширення через сили, які підпирають стінки бойка. У цьому випадку збільшується інтенсивність витягування і більш м'яка схема напруженого стану сприяє збільшенню пластичності. Увігнуті бойки варто застосовувати при куванні малопластичних сплавів.

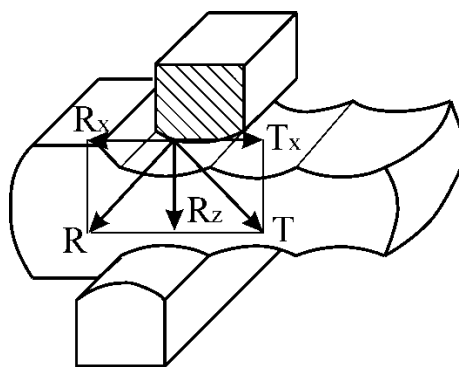


Рис. 3.15. Схема протяжки опуклими бойками

Комбіновані бойки застосовують звичайно в сполученні верхнього плоского й нижнього вирізного. Зручність застосування таких бойків полягає в тім, що якщо буде потреба міняють тільки нижній боек, перемінити який досить легко.

3.1.4. Розкочування

Під розкочуванням розуміють операцію кування кільцевих поковок, при якій збільшується діаметр кільцевої заготовки за рахунок зменшення товщини стінок шляхом послідовного впливу інструмента (рис. 3.16).

Розкочування застосовують як остаточну операцію при куванні кілець, що мають незначну висоту, як заготовчу операцію при одержанні кілець, виготовлених на ковальській оправці, як заготовчу операцію для всіх пустотілих поковок (барабанів котлів, скрубєрів, колон для синтезу й каталізу тощо) і для вирівнювання товщини стінок.

Розкочування виконують при таких співвідношеннях габаритних розмірів поковки:

$$\frac{D_H}{D_{BH}} \leq 1,5 \quad \text{та} \quad \frac{H_k}{(D_H - D_{BH})} > 1.$$

Розкочування здійснюють за допомогою дорна, що опирається кінцевими ділянками на дві опори, вузьким подовженим бойком, орієнтованим своєю довгою стороною уздовж оправки паралельно фронту преса або молота.

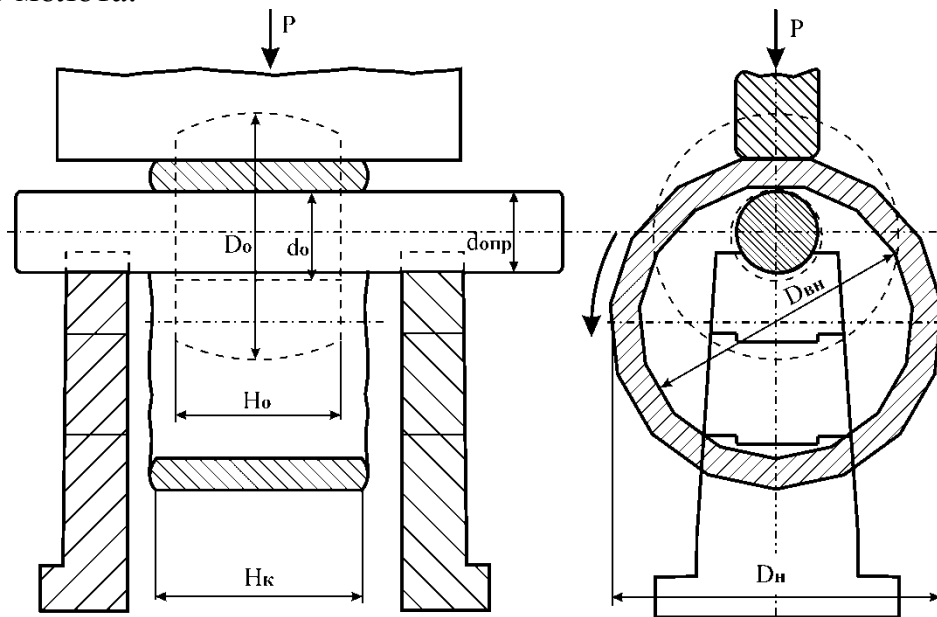


Рис. 3.16. Схема операції розкочування із застосуванням оправки

Зазор між опорами й поковкою не повинен перевищувати 100...150 мм. Для одержання певного укову на останній розкочувальній операції внутрішній діаметр вихідної заготовки визначають за формулою

$$d_{ПР} = \frac{\left[D_H (1 - Y^2) + D_{BH} (1 + Y^2) \right]}{2Y}, \quad (3.3)$$

де Y - заданий уков.

При розробці технологічного процесу розкочування необхідно визначити розміри вихідної заготовки, тому що в процесі деформації заготовка розширюється.

Висота заготовки після осадження й прошивання:

$$H_3 = K H_{пок}, \quad (3.4)$$

де $H_{пок}$ – висота після розкочування (поковки);

K – коефіцієнт розширення при розкочуванні.

3.1.5. Прошивання

Прошиванням називається ковальська операція, за допомогою якої утворюється наскрізна порожнина в заготовці за рахунок вільного витиснення металу. Застосовують її для поковок, які мають переважно осьовий отвір. Прошивання є однією з основних операцій кування пустотілих поковок. Залежно від застосовуваного інструмента розрізняють прошивання суцільним і пустотілим прошивнями. Вибір способу прошивання залежить від марки сталі, типу й розмірів поковок. Злитки вуглецевої сталі перетином 1500 мм і менш (маса до 10 т) прошивають, як правило, суцільним прошивнем. Злитки більшої маси з легованої сталі прошивають пустотілим прошивнем. У цьому випадку разом з відхрою видаляють центральну зону злитка, що забезпечує більш високу якість поковок.

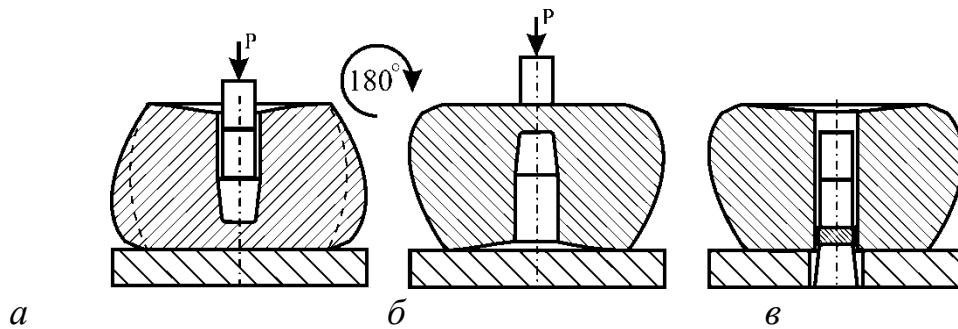
Суцільним прошивнем звичайно роблять отвір діаметром не більше 400...450 мм. Спочатку злиток осаджують до одержання відношення $H/D \approx 0,3$ і встановлюють прибутковою частиною донизу. Прошивень впроваджують у поковку. Висота прошивня звичайно невелика, тому для видавлювання його використовують надставки, діаметр яких на 20...30 мм менше, ніж у прошивня (рис. 3.16). Прошивання ведуть до утворення перемички, 15...20 % від висоти заготовки, яку прошивають (рис. 3.17, а), для великих злитків - не більше 100...140 мм. Потім кантують (рис. 3.17, б) і пробивають отвір іншим прошивнем, діаметр якого на 10...15 мм менше основного (рис. 3.16, в).

До недоліків прошивання суцільним прошивнем відноситься можливість роздачі центральної неякісної частини злитка в тіло поковки, зменшення висоти й збільшення бочкоутворення, утяжка торців заготовки. Зменшення висоти заготовки можна уникнути, якщо обрати відношення діаметра прошивня до діаметра заготовки, яку прошивають:

$$d_{np} / D < 0,5...0,6.$$

Прошиванням пустотілим прошивнем одержують отвори діаметром більше 400...450 мм. Порядок прошивання такий же, як і суцільним прошивнем, тільки надставки роблять пустотілими. Зовнішній діаметр їх повинен бути таким, щоб забезпечити зовнішній зазор 10...15 мм, а внутрішній - 15...30 мм (рис. 3.18). Зусилля прошивання пустотілим

прошивнем звичайно не розраховують, тому що воно значно менше зусилля осадження, що йому передує. При необхідності його можна розрахувати за формулою для суцільного прошивня, приймаючи кільцевий поперечний переріз порожнього прошивня рівним приведеному діаметру суцільного.



а – прошивання з утворенням перемички; б – кантування недокова на 180°; в - пробивання отвору

Рис. 3.17. Прошивання заготовки суцільним прошивнем

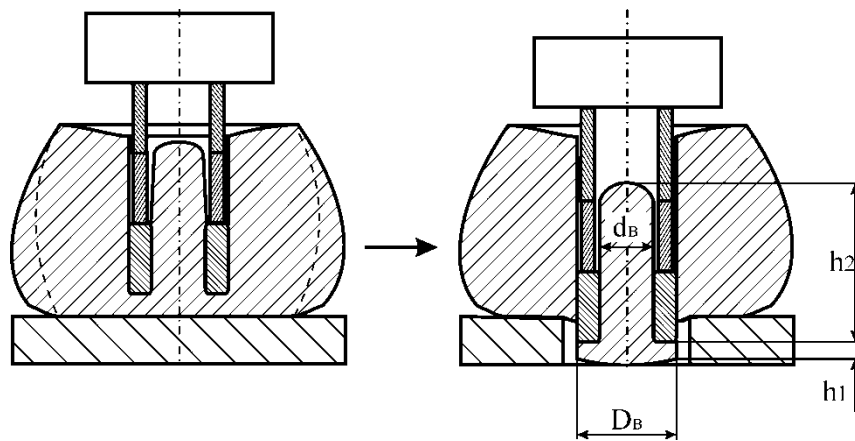


Рис. 3.18. Прошивання заготовки пустотілим прошивнем

Розглянуті в лекції операції, а також **пережим, передача, обрубка, надрубка, розрубка, виправлення** і складають основні операції кування, які застосовують для отримання заготовок необхідної форми із підвищеним рівнем механічних характеристик матеріалу.

ЛЕКЦІЯ №4
РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТА
ОСНОВ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІКИ ФОРМОУТВОРЕННЯ
ЗАГОТОВОК

4.1.. Розвиток основ моделювання механіки формоутворення заготовок

Широке впровадження ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском (ОМТ) стримується через недостатньо розвинутий розрахунковий апарат механіки формоутворення, який покликаний забезпечити: визначення кінематики плину металів і оцінку впливу на неї параметрів технологічних процесів; визначення пластичності металів; аналіз напружено-деформованого стану і накопичення пошкоджень в матеріалі заготовок; визначення впливу величини використаного ресурсу пластичності на службові характеристики виробів.

Таким чином, актуальність теми визначається необхідністю розробки і впровадження в металообробку нових процесів локального деформування (ЛД) з розширеними можливостями щодо формування високоякісних заготовок необхідної форми та розмірів.

Метою даної лекції є формування напряму розвитку процесів ЛД на основі моделювання механіки формоутворення заготовок.

На сьогодні широкого визнання та застосування для оцінки граничного стану матеріалів за умови пластичного деформування отримала теорія деформовності. Проте до порівняно недавнього часу було відсутнє чітке уявлення про місце цього підходу серед інших теорій і моделей руйнування та критеріїв граничного стану матеріалів. Важливі кроки по встановленню вказаних зв'язків зроблено у працях В. Колмогорова, Г. Деля, В. Огороднікова. Один із кроків полягає у з'ясуванні відмінностей між різними безрозмірними показниками напруженого стану та встановленні важливих переваг показника $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ - перший інваріант тензора σ_{ij} і другий інваріант девіатора $\sigma_{ij} - I_1(T_\sigma)/3$ напружень. Цей показник використовується для визначення одного з фундаментальних понять теорії деформовності – кривої граничних деформацій. Проте, слід зазначити, що у класичній літературі з теорій пружності, пластичності, повзучості та міцності в якості безрозмірного показника напруженого стану традиційно використовувалися параметр Надаї-Лоде μ_σ

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (4.1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; третій інваріант напрямного тензора напружень D ; кут ψ виду напруженого стану:

$$D = \frac{\cos(3 \cdot \psi)}{\sqrt{54}}, \quad (4.2)$$

та інші подібні показники.

Детальний аналіз взаємозв'язків між такими показниками наведено за умови плоского напруженого стану.

І лише в період становлення та розвитку теорії деформовності, що прийшовся на другу половину минулого століття, в класичних критеріях міцності починає фігурувати показник η , проте без належного обґрунтування доцільності застосування саме цього показника.

У низці праць показано, що між фізично можливими варіантами плоского напруженого стану та значеннями показника η існує взаємно однозначна відповідність. Як наслідок, залежність $\sigma_u = \sigma_u(\eta)$ представляється однозначною функцією, що полегшує візуальну оцінку результатів зіставлення та порівняння аналітичних і експериментальних даних стосовно текучості та міцності за умов плоского напруженого стану.

Вказане представлення зображено на рис. 4.1 і є альтернативою традиційному представленню умов текучості та міцності у головних напруженнях.

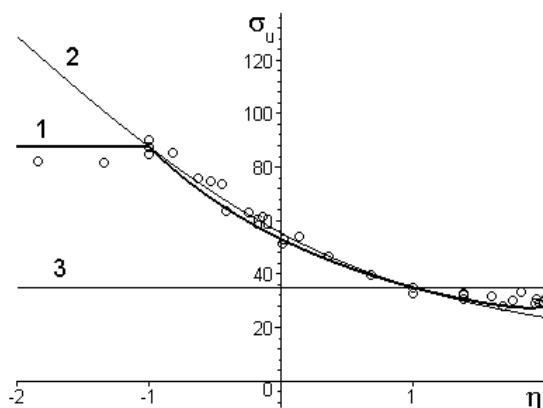


Рис. 4.1. Подання розрахункових і експериментальних даних з міцності чавуну у вигляді залежності інтенсивності напружень від показника напруженого стану:

1 – умова Писаренко-Лебедева, 2 - умова Баландіна, 3 - умова Мізеса.

Що ж стосується так званих класичних показників напруженого стану, то для будь-якого із них одному й тому самому значенню показника відповідає декілька фізично різних варіантів плоского напруженого стану. Ця обставина свідчить про безальтернативне використання показника η у створенні математичних моделей плоского напруженого стану.

У процесах обробки тиском плоский напружений стан найчастіше всього виникає на вільній поверхні заготовки. Нерідко саме ця зона є найнебезпечнішою з точки зору утворення тріщин в матеріалі заготовок. Саме тому, вісесиметричний стиск циліндричних зразків є не тільки одним з найважливіших способів лабораторних випробувань для визначення механічних властивостей матеріалів, а й може використовуватися для моделювання поширених технологічних операцій, зокрема, штампування обкочуванням, вальцювання тощо. Ступінь осадження, що відповідає появі

тріщин на бічній поверхні заготовки, залежить від інтенсивності бочкоутворення, яка у свою чергу визначається умовами тертя на контакті з інструментом.

Наявні математичні моделі та інформаційні технології надають можливість описувати і вивчати закономірності пластичного деформування і руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні, а також можуть бути покладені в основу математичного моделювання інших подібних процесів.

У відповідності до експериментально-аналітичного методу в роботах В. Михалевича, В. Матвійчука, Ю. Добранюка отримано математичне описання кривої граничних деформацій за умови нестационарного деформування, яке виникає при вісесиметричному стиску за наявності тертя на торцях циліндричних зразків :

$$\begin{cases} \eta = \omega(t_*(m)) \\ \varepsilon_*(t_*(m), m) = m \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{1}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau. \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\frac{m}{a_2} \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{\exp \left[\omega(\tau) \cdot \ln \left(a_1 \cdot \frac{1 - \omega(\tau)}{2 \cdot a_2} + a_2 \cdot \frac{1 + \omega(\tau)}{2 \cdot a_3} \right) \right]}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau - 1 = 0. \quad (4.4)$$

де m – параметр, що характеризує коефіцієнт тертя на торцях;

$$\omega(\tau) = f(1, \tau) \cdot f(2, \tau), \quad f(k, \tau) = \left(1 + (-1)^k \cdot 3 \cos^{2k}(\tau) \right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}}, \quad k = 1, 2; \quad (4.5)$$

ε_* та t_* - накопичена деформація ε_u та параметр t (характеризує стадію процесу пластичного деформування) параметричного представлення траєкторії деформацій в координатах $\varepsilon_u = \varepsilon_u(\eta)$, що відповідають моменту досягнення граничного стану; $a_1 > a_2 > a_3 > 0$ – деякі постійні, що визначаються за результатами дослідів з визначення граничних деформацій за різних видів напруженого стану в умовах стаціонарного деформування.

Результати розрахунків за наведеною моделлю наведено на рис. 2 .

Узагальнення математичної моделі напружено-деформованого стану (НДС) бічної поверхні при вісесиметричному осадженні циліндричних зразків, що є структурною складовою співвідношень (4.3) – (4.5), здійснено В. Михалевичем і показано, що для одних і тих самих значень a_1, a_2, a_3 , в залежності від вибору аналітичного співвідношення для апроксимації кривої граничного стану при стаціонарному деформуванні $\varepsilon_{*c} = \varepsilon_{*c}(\eta)$, поведінка цієї кривої у досліджуваних межах може суттєво відрізнятись. Проте до цього часу відсутні дослідження впливу зазначеної розбіжності на розрахункові значення граничних деформацій.

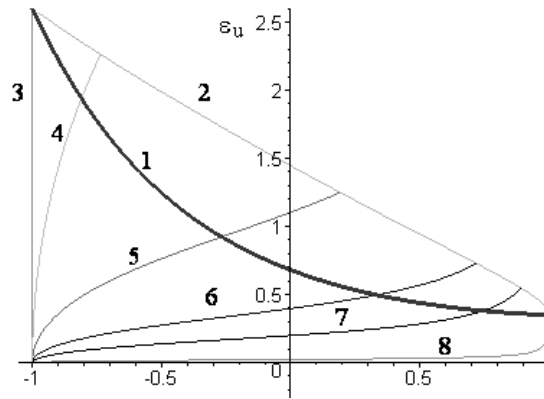


Рис. 4.2. Залежність граничних деформацій від показника η при торцевому стисненні циліндричних зразків: 1 – крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні; 2 – крива граничних деформацій при нестаціонарному деформуванні; 3 ÷ 8 - траєкторії деформування за різних умов тертя на торцях (параметр m): 3 – $m = 30$, 4 – $m = 2$, 5 – $m = 0.5$, 6 – $m = 0.18$, 7 – $m = 0.09$, 8 – $m = 0.01$

Одним з ключових результатів стало встановлення загальних концепцій і наявних відмінностей тензорної моделі тривалої міцності О. А. Ільюшина і моделей граничних деформацій, що побудовані відповідно до концепцій теорії деформівності. Це дозволило об'єднати два зазначених підходи до побудови моделі в рамках єдиної, узагальненої, що, в свою чергу, призвело як до збагачення самої теорії підсумовування пошкоджень, так і до напрямів її застосування. Серед найважливіших наслідків зазначеного об'єднання стала розробка моделі спадкового типу, яка враховує залежність граничної деформації від закону зміни швидкості деформації при гарячому деформуванні.

Відомо, що гранична до руйнування деформація, яку набуває матеріал за умови гарячого деформування, залежить від швидкості деформації $\dot{\epsilon}$. За даними, які наведені у роботах В. Михалевича, зокрема з посиланням на інші джерела, гранична деформація залежить від закону зміни швидкості деформації, що може бути відображено скалярною моделлю підсумовування пошкоджень

$$\psi(t) = \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\epsilon}) \, d\tau, \quad (4.6)$$

де $0 \leq \psi \leq 1$, $\psi(0) = 0$, $\psi(t_*) = 1$; t , τ - час; t_* – граничний час, що відповідає руйнуванню зразка; $\varphi(t - \tau, I(\tau))$ – ядро спадковості; f – деяка функція.

Сукупність аксіом, постулатів та гіпотез, що покладено в основу побудови моделі, а також аналіз результатів моделювання показав, що в рамках такого підходу може бути описане широке коло процесів, які виходять далеко за рамки дослідження властивостей матеріалів.

Поява моделі (4.6) надала можливість сформулювати дві важливі, як в

теоретичному, так і практичному плані, варіаційні задачі ізопериметричного типу.

Перша задача формулюється так: визначити закон зміни швидкості деформації $\dot{\epsilon}$ при якому задана накопичена деформація ϵ_* досягається за найкоротший час t_* за умови, що $\psi(t_*) = 1$

$$\begin{aligned} t_* &= t_*(\dot{\epsilon}) \quad \text{min,} \\ \epsilon_* &= \int_0^{t_*} \dot{\epsilon} \quad (4.7) \\ \int_0^{t_*} \varphi(t_* - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\epsilon}) &= 1. \end{aligned}$$

Задача (4.7) не може бути віднесена до класичних задач ізопериметричного типу, тому що значення накопиченої деформації, яке представляється визначенням інтегралом, є відомим, а мінімізується верхня межа функціонала, який пов'язаний критеріальною умовою.

Формулювання другої задачі. Задано час t_Σ . Необхідно визначити закон зміни швидкості деформації $\dot{\epsilon}$, $t \in [0, t_\Sigma]$, відповідно якому матеріал набуває найбільшої деформації ϵ_Σ . Очевидно, що мають справджуватися співвідношення $\epsilon_\Sigma = \epsilon_*$, $t_\Sigma = t_*$, отже

$$\begin{aligned} \epsilon_* &= \int_0^{t_*} \dot{\epsilon} \quad \rightarrow \max, \\ \int_0^{t_*} \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\epsilon}) &= 1. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Слід зазначити, що нам невідомі подібні постановки оптимізаційних задач в теорії підсумовування пошкоджень незалежно від використовуваних моделей.

Аналіз задачі (4.8) показав, що за умов обмеження функцій $\dot{\epsilon}$ класом гладких кривих розв'язку варіаційної задачі не існує.

Показано, що при розширенні області допустимих функцій до класу кусково-сталих функцій, зокрема для двохступеневої схеми

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_1 & 0 \leq t \leq t_1; \\ \dot{\epsilon}_2 & t_1 \leq t \leq t_*, \end{cases} \quad (4.9)$$

задача (4.8) із врахуванням (4.9) може бути зведена до задачі нелінійного програмування [4.10]:

$$\begin{aligned} \epsilon_* &= \dot{\epsilon}_1 t_1 + \dot{\epsilon}_2 (t_* - t_1) \quad \rightarrow \max, \\ -\left(\frac{t_* - t_1}{t_{*1}}\right)^n + \left(\frac{t_*}{t_{*1}}\right)^n + \left(\frac{t_* - t_1}{t_{*2}}\right)^n &= 1, \\ t_1 &\leq t_{*1}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

де $t_{*1} = t_{*c}(\dot{\epsilon})$ та $t_{*2} = t_{*c}(\dot{\epsilon})$ - окремі точки кривої граничного стану при стаціонарному деформуванні у координатах $t_{*c} = t_{*c}(\dot{\epsilon})$, яка відображає властивості матеріалу.

Показано, що задача (4.10) може бути розв'язана за допомогою побудови функції Лагранжа та врахуванні умови $t_1 = t_{*1}$. Остаточно розв'язок задачі (4.10) зведено до розв'язку системи [4.9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left[\dots \right] \\ \gamma^n - \dot{\epsilon} \\ t = \gamma \dot{\epsilon} \end{array} \right. \quad (4.11)$$

На основі даних кручення зразків із сталі 14X17H2 при температурі 1150⁰С відповідно до отриманих розрахунків розбіжність між граничними значеннями накопиченої деформації для неоптимальної та оптимальної схем деформування може сягати до 10%.

Отримані результати надають можливість розширити коло прикладних задач, що можуть бути розв'язані на основі моделювання механіки формоутворення, зробити сам процес моделювання більш зручним, а його результати більш обґрунтованими. Крім того, важливим є розвиток теорії підсумовування пошкоджень, області застосування якої вийшли далеко за межі механіки та машинобудування.

4.2. Розвиток процесів локального деформування на основі моделювання механіки формоутворення заготовок

При розробці процесів ОМТ актуальним є розширення технологічних можливостей маловідходного виробництва високоякісних виробів складної форми. Особливе місце серед процесів ОМТ займають способи ЛД, при яких деформація охоплює відносно невеликий об'єм матеріалу заготовки, а формоутворення відбувається внаслідок поступового взаємного переміщення інструменту та заготовки. Незначна площа контакту інструмента з заготовкою обумовлює відносно невеликі сили деформування, а можливість створити сприятливі умови плину матеріалу в зоні контакту дозволяє формувати розвинуті тонкостінні елементи заготовок складної форми. Разом

з тим, можливості досягнення великих деформацій обмежуються небезпекою руйнування заготовок та втрати стійкості їх окремих частин. Важливим завданням є також забезпечення високої якості виробів.

Основними завданнями дослідження є визначення впливу на НДС матеріалу заготовки ступеня локалізації деформації, оцінка впливу технологічних параметрів процесів ЛД на кінематику плину металу, оцінка ресурсу пластичності матеріалу деформованої заготовки та встановлення її граничних геометричних параметрів.

З метою дослідження впливу на НДС матеріалу заготовки ступеня локалізації деформації було проведено моделювання процесів ЛД шляхом втискування кульки і ролика в плоский напівпростір. Моделювання проводили на різних металах, зокрема на сплаві ЕП718, який добре зміцнюється і має сильну залежність твердості від інтенсивності деформацій. Кульку втискували на різну глибину із забезпеченням різних граничних умов на контакті. На рис. 4.3, а приведений типовий характер розподілу інтенсивності деформацій ε_u в зоні пластичного відбитку, отриманий методом вимірювання твердості.

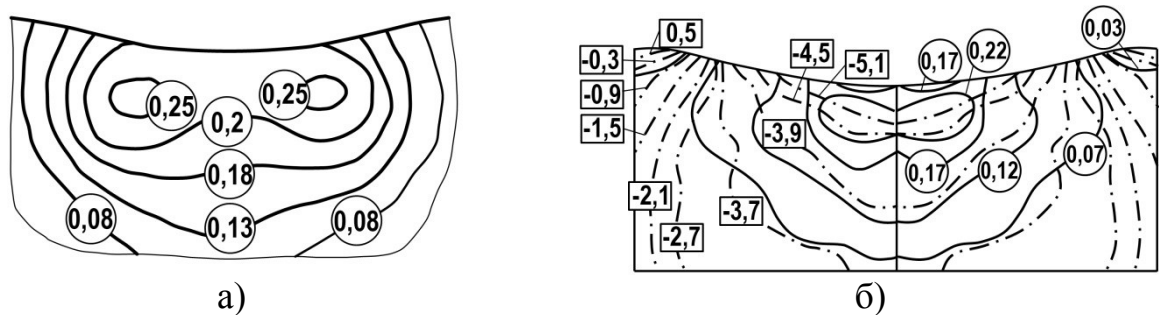


Рис. 4.3. Розподіл в зоні пластичного відбитку ізолейн: $\varepsilon_u = const$ (○), $\eta = const$ (□)

Отже, характер деформованого стану в зоні відбитку є досить нерівномірним. Інтенсивність деформацій на поверхні відбитку сягає лише 50-80% максимальної. Найбільша інтенсивність деформацій спостерігається поблизу центра відбитку і віддалена від поверхні контакту на глибину $\approx 0.1d$, при цьому глибина проникнення пластичної зони $h_{pl} \approx (1,5-1,6)d$, де d -діаметр відбитку або його ширина.

Для дослідження НДС пластичної зони при втискуванні інструменту застосовано також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R -функцій [18]. При цьому здійснювалося поетапне втискування в заготовку кульки (вісесиметрична задача) та ролика (плоска задача). Характер розподілу ізолейн $\varepsilon_u = const$ в зоні відбитку (рис. 4.3, б), отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості (рис. 4.3, а).

Показник жорсткості напруженого стану змінюється від величин, що відповідають усесторонньому стиску ($\eta = -5 \dots -3$) на осі симетрії відбитку, до

зсуву-розтягу ($\eta \geq 0$) на краю відбитку, в місці утворення пластичного валика.

Таким чином, для процесів ЛД в зоні втискування інструменту характерна «м'яка» схема напруженого стану. Глибина проникнення пластичної деформації залежить від діаметру (ширини) відбитку і, відповідно, розмірів інструмента та величини подачі. Для забезпечення відносно рівномірного деформованого стану заготовки необхідно застосовувати інструменти (валки) з більшим діаметром, призначати більшу величину подачі, використовувати ефективні мастила. Наближення зони максимальної деформації до поверхні заготовки можливо шляхом зменшення контактної тертя та використання на заключних етапах обробки деформуємих тіл менших розмірів.

В якості досліджуваних процесів ЛД в роботі вибрано штампування обкочуванням (ШО) та вальцювання заготовок.

При ШО відбувається деформування заготовки в торець та під різними кутами до її поздовжньої осі. До методів ШО відноситься сферорухоме штампування (нерухома заготовка обкочується конічним валком) та торцеве розкочування (обертається заготовка і валок, конічний або циліндричний).

Сферорухоме штампування отримало розвиток завдяки працям С.П. Гожія, Л.Т. Кривди, А.С. Пшенишнюка та ін.. Даний метод дозволяє обробляти заготовки за схемами осаджування, висаджування, комбінованого витискування, рельєфного формування та ін., забезпечуючи при цьому високу якість виробів.

При сферорухомому штампуванні чинити вплив на механіку формоутворення заготовок можна змінюючи (незначною мірою) кут нахилу валка, характер його руху та форму матриці.

Метод торцевого розкочування розроблений завдяки працям К. Н. Богоявленського, В. В. Лапіна та інших дослідників. На рис. 4.4 представлені схеми торцевого розкочування, основними елементами яких відповідно до рис. 4.4,а є: 1 – заготовка, 2 – матриця, 3 – розкочувальний валок (циліндричний або конічний), 4 – шпindel, 5 – оправка, 6 – штовхач.

Дослідженнями встановлено, що при торцевому розкочуванні заготовок циліндричним валком напрям плину матеріалу заготовки залежить переважно від величини та напрямку зміщення осі валка від осі поперечного перерізу заготовки d , по відношенню до напрямку обертання заготовки.

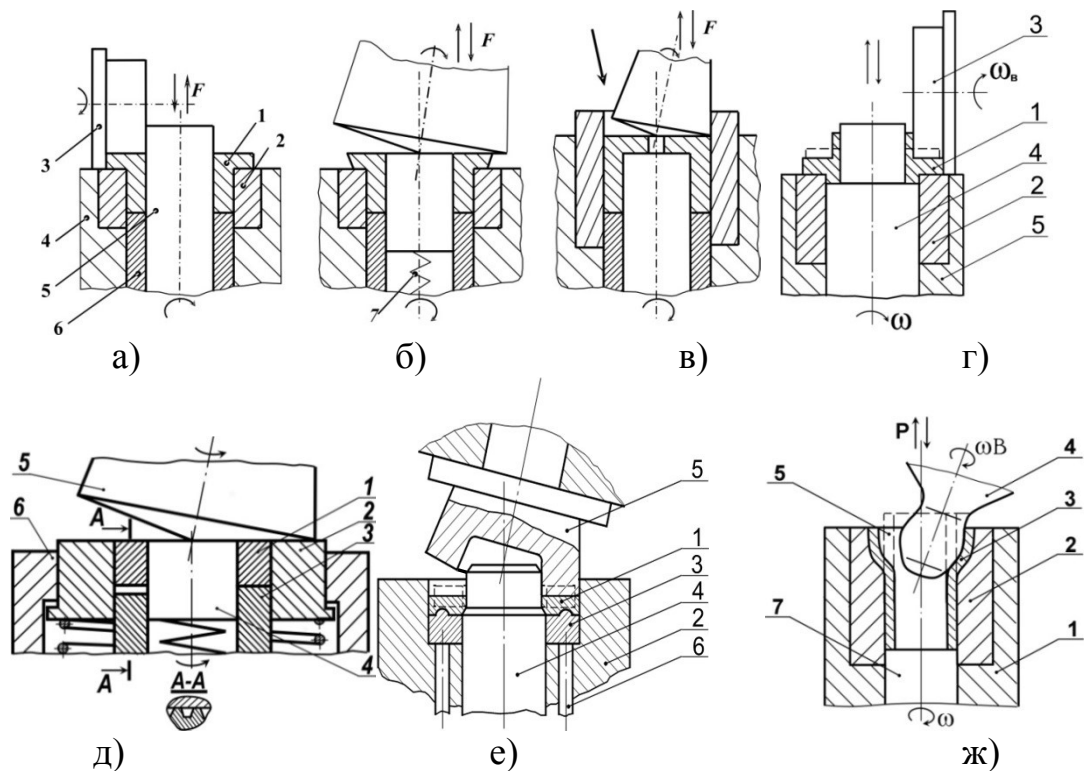


Рис. 4.4. Схеми торцевого розкочування циліндричним і конічним валками: висаджування зовнішнього бурта (а), (б); висаджування внутрішнього бурта (в); висаджування і зворотне витискування (г); пряме витискування зубчастої поверхні (д); осаджування-калібрування (е); роздавання-калібрування (ж)

Основними параметрами, що впливають на напрям плинину матеріалу заготовки при торцевому розкочуванні конічним валком, є кут нахилу a осі валка, а також величина і напрям зміщення вершини валка d по відношенню до осі обертання заготовки.

З використанням апарату аналітичної геометрії отримана залежність кута ϕ між векторами швидкості точок контактної поверхні заготовки і валка від параметрів процесу розкочування. Кут між проєкціями векторів швидкості точок циліндричного валка і заготовки на площину розкочування в місці контакту визначається співвідношенням

$$\phi = \arctg \sqrt{\left(\frac{\sqrt{R_g^2 - (h - R_g)^2} + \delta}{R} \right)^2}, \quad (4.12)$$

де R_g – радіус валка, h - глибина втискування валка, R – радіус заготовки.

Кут ϕ між векторами швидкостей точок контактної поверхні заготовки і конічного валка від параметрів процесу розкочування визначається залежністю

$$\phi = \arctg \left[\frac{(k_1 - k_2)}{(1 + k_1 k_2)} \right], \quad (4.13)$$

де $k_1 = -x_0 / y_0$, $k_2 = m / l$ – кутові коефіцієнти проєкцій прямих, на яких

лежать вектори швидкості точок заготовки і валка, на утворену розкочуванням площину. Залежність (4.13) кута ϕ від напрямку та величини зміщення валка δ при різних кутах нахилу його осі графічно представлена на рис. 4.5 а, від радіусу заготовки - на рис. 4.5 б.

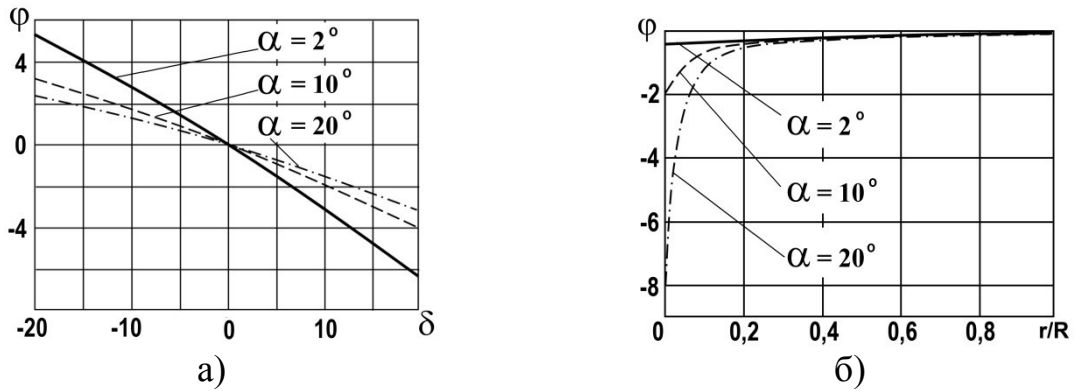


Рис. 4.5. Залежність кута ϕ від напрямку та величини зміщення валка δ (а) і радіусу заготовки (б) при різних кутах нахилу валка

Аналіз отриманих залежностей показує, що при додатному зміщенні вершини валка (від осі обертання заготовки в напрямку плями контакту) матеріал тече від центру заготовки ($\phi < 0$), а при від'ємному – до центру ($\phi > 0$). Інтенсивність плинущу не симетрична відносно нульового зміщення, тобто матеріал більш інтенсивно тече у напрямку від центру. При збільшенні кута α інтенсивність відцентрового плинущу збільшується. Максимальна інтенсивність плинущу спостерігається на відстані $r < 0,2R$ від центру заготовки (рис. 4.5, б).

Встановлений вплив активних сил тертя на характер плинущу матеріалу наглядно представлений на рис. 4.6, що дозволило розробити ряд ефективних процесів штампування обкочуванням.

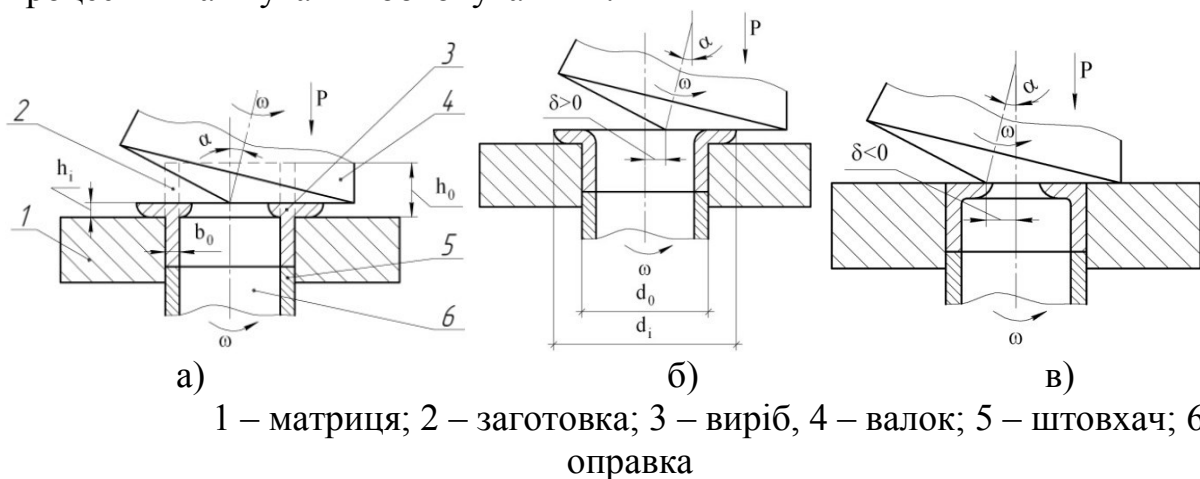


Рис. 4.6. Положення валка і характерні геометричні параметри заготовки при висаджуванні розкочуванням буртів: а) зовнішніх і внутрішніх; б) зовнішніх; в) внутрішніх

На рис. 4.7, а показано характер розподілу ізоліній інтенсивності

деформацій і напружень в перерізі зовнішнього бурта трубної заготовки із сталі 30ХГСА, а на рис. 4.7, б – в перерізі кільцевої заготовки складного профілю з міді М0б, виготовлених торцевим розкочуванням.

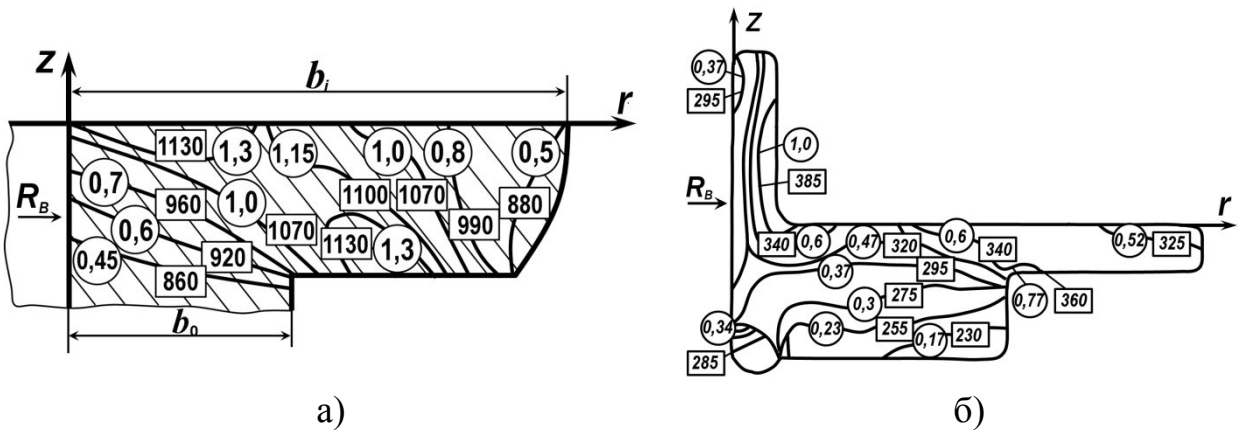


Рис. 4.7. Характер розподілу в перерізі зовнішнього бурта трубної заготовки (а) і кільцевої заготовки (б), параметрів $\varepsilon_u = const$, $\sigma_u = const$ за результатами вимірювання твердості

Дослідження операції висаджування торцевим розкочуванням на трубних заготовках зовнішніх буртів з вільною поверхнею здійснювали також із застосуванням методу сіток та імітаційного моделювання за допомогою МСЕ.

На рис. 4.8 представлені результати розрахунків інтенсивності деформацій в перерізі бурта осаджуваного торцевим розкочуванням, а на рис. 4.9 – показника жорсткості напруженого стану η протягом операції висаджування для точок, що знаходяться на вільній поверхні та в перерізі бурта.

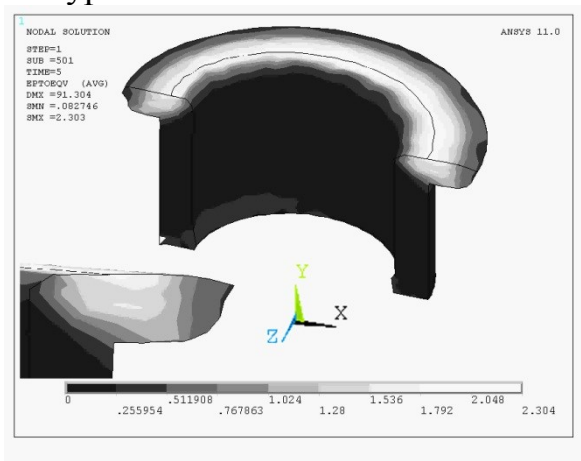


Рис. 4.8. Розподіл інтенсивності деформацій в перерізі бурта, отриманий МСЕ

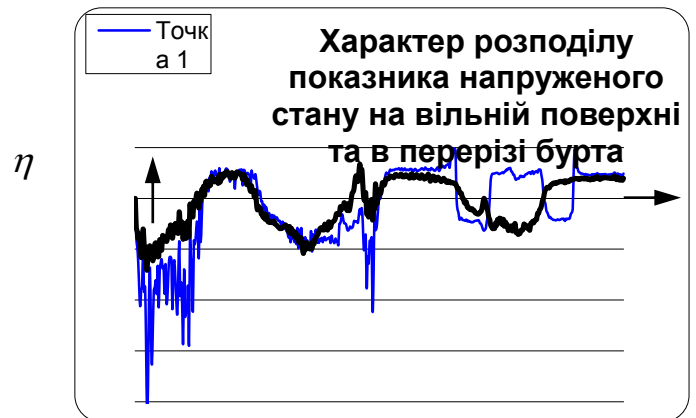


Рис. 4.9. Розподіл показника η на вільній поверхні і в перерізі бурта

На рис. 10 представлені діаграми пластичності металів і шляхи деформування матеріалу вільної поверхні зовнішніх буртів при їх висаджуванні, в залежності від параметрів торцевого розкочування.

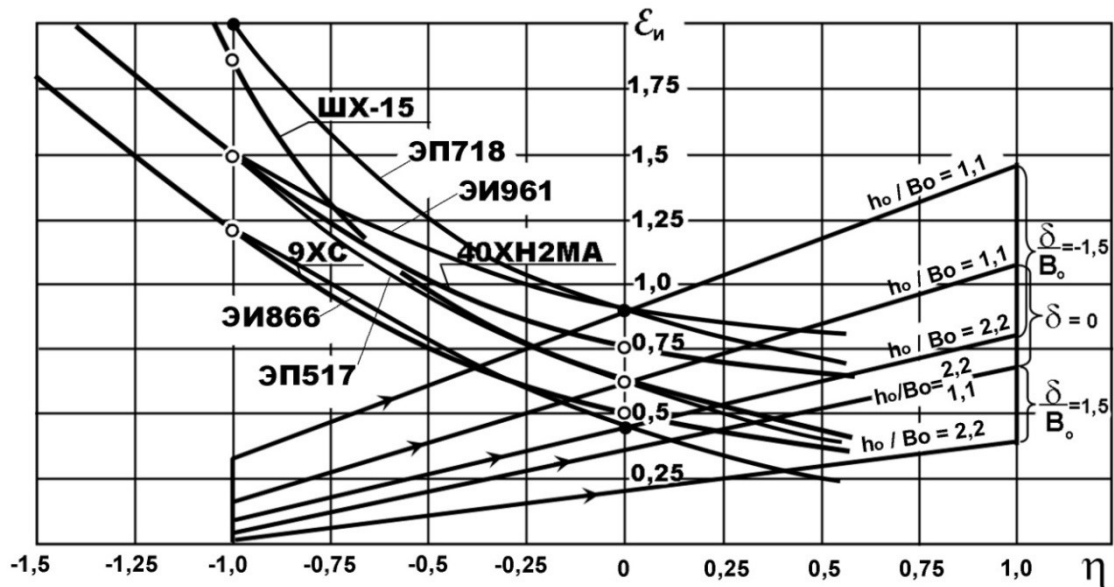


Рис. 4.10. Діаграми пластичності сталей і сплавів —○— та шляхи деформування —→— вільної поверхні периферійної частини буртів в процесі висаджування розкочуванням (h_0, b_0 - вихідна під розкочування висота і товщина стінки трубної заготовки)

Деформівність заготовок в реальному технологічному процесі залежить від схеми формозміни, пластичності матеріалу, параметрів процесу і заготовки. Найбільш небезпечними через руйнування схемами ШО є висадка зовнішнього бурта, роздача та відбуртовка трубних заготовок.

При висадці зовнішніх буртів гранична до руйнування деформація зменшується із збільшенням відношення висоти виставленої під розкочування частини заготовки до товщини стінки h_0 / s_0 . До погіршення умов деформівності приводить зміщення вершини кінцевого валка від осі заготовки у напрямку плями контакту внаслідок появи в приконтактних шарах заготовки напружень розтягу від дії сили тертя.

На основі критерію деформовності В.А. Огороднікова отримано значення граничного діаметру зовнішнього бурта розкочувальної заготовки, яке описується співвідношенням

$$d_p = d_0 \cdot \exp\{0.865 \varepsilon_{*c}(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w - 0.14 [\varepsilon_{*c}(\eta = 0) \cdot \exp(-\eta_k \ln \lambda) w]^2\} \quad (4.14)$$

де η_k - значення показника η в точці перетину шляху деформування часток матеріалу небезпечної зони заготовки із діаграмою пластичності; w - коефіцієнт впливу історії деформування на пластичність. При висаджуванні розкочуванням зовнішніх буртів $w = 1, 2 \dots 1, 35$.

Матеріали із пологою діаграмою пластичності ($\lambda = \varepsilon_p(\eta = -1) / \varepsilon_p(\eta = 0) < 1,5$) можуть руйнуватись не на вільній поверхні бурта, а в зоні із максимальними деформаціями на відстані s_0 від внутрішньої поверхні вихідної заготовки (див. рис. 4.7 а). У цьому випадку допустимий ступінь деформації необхідно перевіряти також за граничним ступенем осаджування бурта

$$\frac{h_0}{h_p} = \exp[\varepsilon_{*c}(\eta = 0) \cdot \exp(1.5 \ln \lambda)]. \quad (4.15)$$

При розкочуванні трубних заготовок за схемою висаджування зовнішніх буртів, у випадку $h_0 / s_0 > 2 \dots 2,5$, відбувається викривлення стінки і утворення складки, що є технологічним обмеженням процесу через втрату стійкості заготовки. Для уникнення складкоутворення при розкочуванні заготовок із відносною товщиною стінки $s_0 / d_0 < 0,1 \dots 0,12$ і відносною вихідною висотою $h_0 / s_0 > 3$ формування зовнішніх буртів можна здійснювати за схемою відбуртовки. Виключення складкоутворення при цьому досягається шляхом зміщення вершини валка від осі заготовки у напрямі плями контакту на величину

$$\delta = \frac{s_0}{(1,5 \dots 2) \cdot \mu} \quad (4.16)$$

де μ - коефіцієнт тертя на поверхні валок-заготовка.

Розкочування заготовок за схемою відбуртовки супроводжується появою значних напруг розтягу, тому такому виду розкочування можна піддавати матеріали із високою пластичністю, яка характеризується величиною відносного звуження шийки при розтягу зразка $\psi_{uu} = 60 \dots 65\%$.

Переформування розкочуванням квадратних заготовок в круглі (рис. 4.11, а) є ефективним при виготовленні заготовок під наступну витяжку, оскільки наближає виробництво до безвідходного. Зменшенню потоншення центральної частини заготовки сприяє застосування розкочування з невеликим кутом нахилу валка, для чого найкраще підходить процес сферорухомого штампування з $\alpha = 2^\circ$.

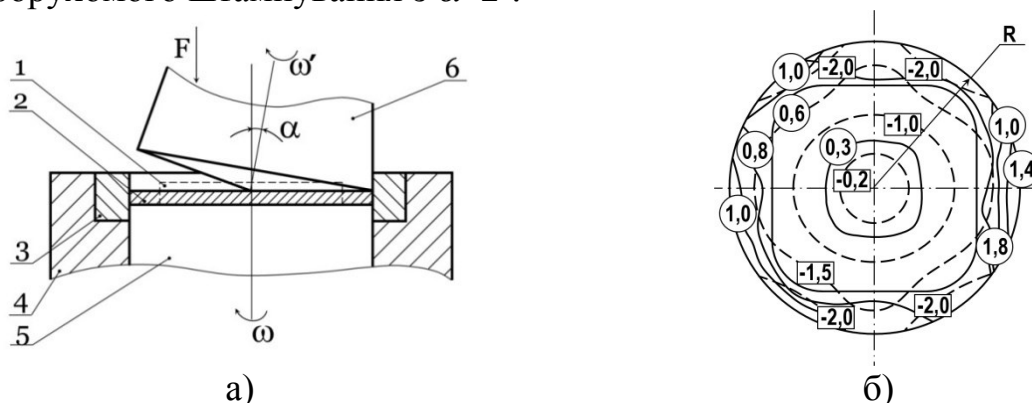


Рис. 4.11. Схема переформування (а) і характер розподілу (б) інтенсивності деформацій ε_u - \bigcirc та показника η - \square переформованої заготовки

На рис. 4.11, б показаний характер розподілу НДС танталової заготовки, переформованої з квадрату на круг діаметром $d=31$ мм. Мінімальна інтенсивність деформацій ($\varepsilon_u \leq 0,5\varepsilon_u^{\max}$) спостерігається в центральній частині заготовки на площі, що обмежена колом з радіусом $r = 0,6R$. Найбільша інтенсивність деформацій досягає значень $\varepsilon_u^{\max} = 1,2 - 1,4$ на контурі заготовки, поблизу середин сторін вихідного квадрата. Напружений стан змінюється від $\eta = 0 - 0,5$ в центрі заготовки (при куті нахилу валка $\alpha > 5^\circ$ тут показник $\eta \approx 1$) до $\eta = -2$ поблизу її периферії і $\eta = -0,7 \dots -1,0$ на бокових поверхнях.

Застосування процесу переформування дозволяє змінити анізотропію механічних властивостей матеріалу заготовок. Покращення характеристик матеріалу переформованих розкочуванням заготовок привело до того, що при витяжці циліндричних виробів величина фстонів зменшилася у 2-2,5 рази, а величина граничного ступеня витяжки зросла на 10-15%. При цьому зменшилася відносна різниця товщини стінки по периметру витягнутої заготовки, а зміна товщини стінки по її висоті набула лінійного характеру. Що стосується службових характеристик виробів, то використання переформованих танталових заготовок під витяжку корпусів конденсаторів дозволило збільшити електролітичну стійкість конденсаторів в 2-3 рази за рахунок формування сприятливої мікроструктури матеріалу та зменшення його пластичного розпушування.

Зі збільшенням кута α при переформуванні заготовки відбувається значне потоншення її центральної частини з наступним руйнуванням матеріалу. Даний ефект можна використати при гарячому розкочуванні для утворення порожнин в центральній частині заготовки і формування кільцевих виробів складного профілю, таких як комірцеві фланці трубопроводів тощо.

Вальцювання заготовок поділяється на наступні види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під наступне штампування на пресі або молоті; штампувальне – для отримання штампованих заготовок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей (виробництво заготовок тонкопрофільних компресорних лопаток).

Формувальне вальцювання використовується переважно в якості підготовчої операції до об'ємного штампування з метою цілеспрямованого перерозподілу металу. Цим забезпечується усунення надмірної нерівномірності деформації і неодночасного заповнення металом порожнини штампу при об'ємному штампуванні; досягнення зростання ступеня деформації та виготовлення якісних штампованих виробів із високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складнопрофільованих виробів, в тому числі з криволінійною віссю; формування сприятливої структури металу та покращення його механічних характеристик.

Розвиток процесу вальцювання заготовок на основі моделювання

механіки формоутворення заготовок розглянемо на прикладі вальцювання на гладку бочку з наступним формуванням заготовки з криволінійною віссю (рис. 4.12). Криволінійність вісі заготовки забезпечували за рахунок збільшення ступеня обтискування з випуклої сторони заготовки шляхом використання гладких конічних валків.

Дослідження вказаного процесу деформування було проведено в програмному комплексі DEFORM 3D.

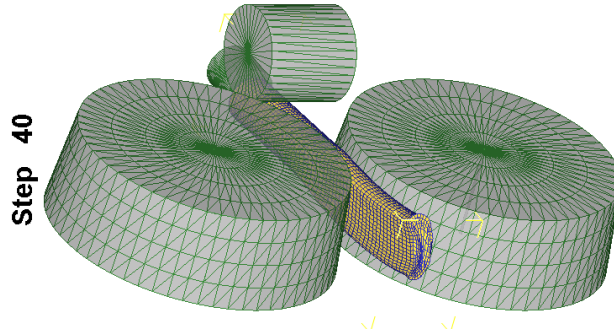


Рис. 4.12. Схема вальцювання криволінійної заготовки

Пошкоджуваність металу в програмному комплексі DEFORM 3D обчислюються відповідно до моделі Cockroft-Latham [24]:

$$\int_0^{\epsilon_u} \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_u} \cdot d\epsilon_u = C,$$

де $\bar{\sigma}_{\max}$ – максимальне головне розтягуюче напруження; C – константа матеріалу.

На рис. 4.13 наведено характер розподілу інтенсивності деформацій і використаного ресурсу пластичності в криволінійній заготовці при вальцюванні.

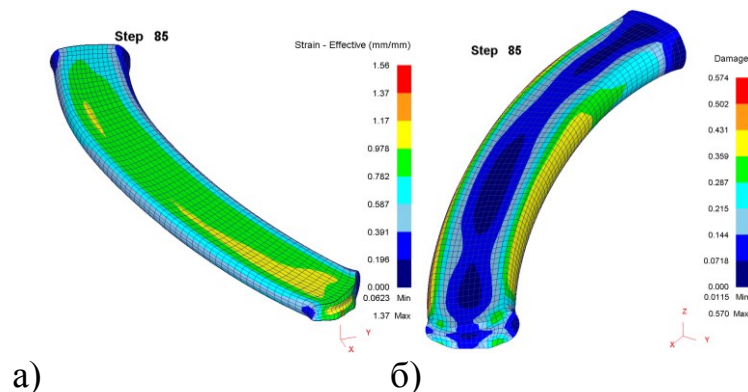


Рис. 4.13. Характер розподілу інтенсивності деформацій а) і використаного ресурсу пластичності б) в криволінійній заготовці при вальцюванні

Для потенційно найбільш небезпечної частини заготовки з точки зору накопичення пошкоджень проведено аналіз НДС. Суть проведеного аналізу полягала в побудові траєкторії деформацій в координатах $\epsilon_u - \eta$ для точки бічної поверхні заготовки.

Траєкторії деформацій, які представлені на рис. 4.14, будували на основі табличних значень компонент напружень та накопиченої деформації, отриманих в результаті імітаційного моделювання деформування заготовки в пакеті DEFORM 3D.

Аналіз результатів моделювання процесу формувального вальцювання свідчить, що на вільній бічній поверхні заготовки буквально на початкових етапах деформування реалізується стабільний напружений стан, близький до одноосного розтягу. Отримана різниця напружено-деформованого стану та рівня обтиснення на різних бічних сторонах заготовки при вальцюванні надає можливість отримання заготовок із криволінійною віссю.

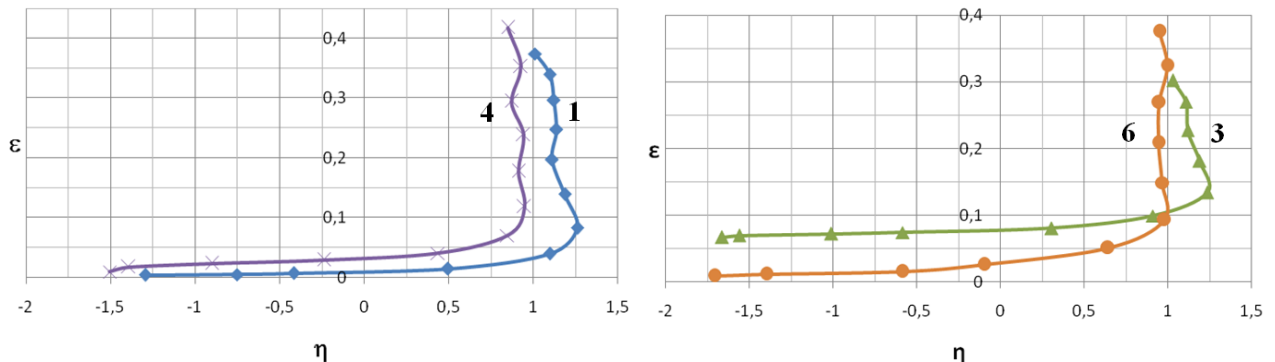


Рис. 4.14. Траєкторії деформацій для різних точок вихідної циліндричної заготовки, побудовані за результатами імітаційного моделювання в програмному комплексі DEFORM 3D: 1,3 – випукла сторона, 4,6 – ввігнута сторона виробу

Для дослідження механіки формоутворення заготовок при калібрувальному вальцюванні проводили аналіз деформованого стану пера компресорних лопаток із застосуванням методу подільних сіток. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити основні закономірності зміни деформованого стану заготовок лопаток при вальцюванні. Підтверджено, що найбільшою за абсолютною величиною є деформація по товщині заготовки $\epsilon_z < 0$ та поздовжня деформація $\epsilon_x > 0$. Поперечна деформація ϵ_y близька до нуля і може приймати невеликі додатні або від'ємні значення в залежності від виду профілю заготовки. На поверхні вальцьованої заготовки спостерігаються значні за площею зони з плоскою деформацією, де $\epsilon_y = 0$. До цих зон можна застосовувати математичний апарат теорії пластичності, розроблений для плоскої деформації.

На характер деформованого стану заготовки суттєвий вплив чинить зміна виду припуску. При еквідистантному припуску деформація по товщині ϵ_z в поперечному перерізі має найбільше значення поблизу крайок пера лопатки. У випадку припуску пропорційного обтискуванню, деформація ϵ_z має постійну величину в кожному поперечному перерізі пера заготовки. При цьому втискування валка починається в середній частині поперечного перерізу, де більша абсолютна величина припуску, що приводить до першочергового подовження серединних ділянок пера заготовки. В міру

збільшення величини обтискування, поблизу крайок пера утворюється утяжина у вигляді смужки не контактуючого з валками металу, на якій навіть при незначних деформаціях можуть виникати тріщини, а при великих деформаціях відбувається руйнування пера при вальцюванні.

При розрахунках НДС пластичної зони вальцьованої заготовки застосовували методику, основу на методах ліній току, функцій напружень і теорії R -функцій. На рис. 4.15 показано отриманий характер розподілу НДС на ділянці заготовки, розташованій між валками.

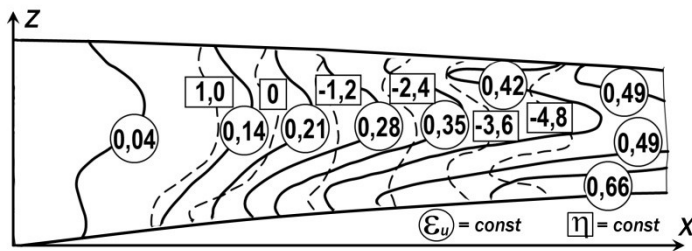


Рис. 15. Характер розподілу НДС в зоні деформації поздовжнього перерізу середини заготовки при вальцюванні

η_c в зоні деформації. Для досліджених сплавів його величина становить $\eta_c = -1,2 \dots -1,5$, причому більші за абсолютною величиною значення відповідають матеріалам з діаграмами пластичності, що мають слабку залежність від показника η .

На рис. 4.16, а показаний розподіл по перу лопатки показника η_c при вальцюванні з еквідистантним припуском, а на рис. 16, б – при використанні припуску, пропорційного обтискуванню.

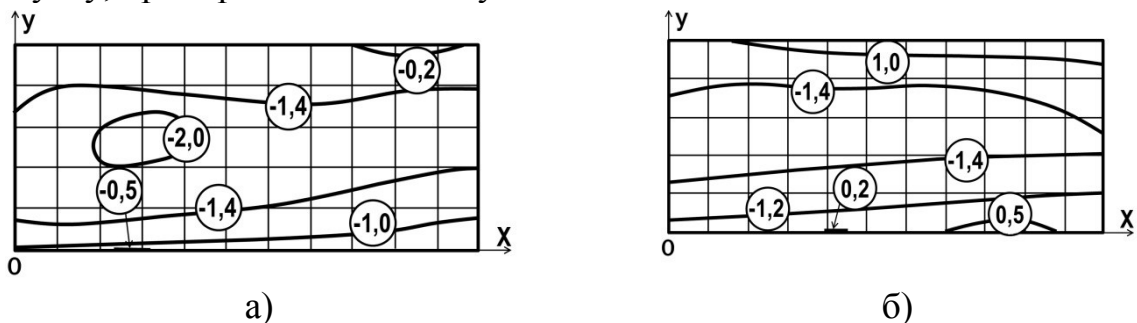


Рис. 4.16. Розподіл показника η_c по перу лопатки ($x=0$ – замкова частина) при вальцюванні з припуском еквідистантним (а) та пропорційним обтискуванню (б)

Для забезпечення сприятливих умов вальцювання, за результатами дослідження НДС матеріалу заготовки був запропонований еквідистантний припуск і методика розрахунку форми і розмірів вихідної заготовки.

За результатами аналізу деформовності сталей і сплавів на основі використання критеріїв деформовності В.А. Огороднікова і В.М. Михалевича запропоновані критерії інженерної оцінки величини використаного ресурсу пластичності ψ_u для найбільш небезпечних, з точки

Показник жорсткості напруженого стану в зоні деформації змінюється від величин $\eta = 1$ на вході в контакт з валками, до величин під валками $\eta = -3 \dots -5$.

Для вдосконалення процесу вальцювання важливо також знати величину середнього за прохід показника

зору руйнування при вальцюванні, зон заготовки. У випадку вальцювання лопаток з пропорційним величині обтискування припуском, використаний ресурс пластичності небезпечної зони заготовки можна визначити за співвідношенням

$$\psi_u = \frac{1}{\varepsilon_*(\eta=0)} \left(\lambda \ln \frac{C^{кр}}{C_{\kappa}^{кр}} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{C_{\kappa}^{кр}}{C_{\lambda}^{кр}} \right), \quad (4.18)$$

де $C^{кр}, C_{\kappa}^{кр}, C_{\lambda}^{кр}$ - товщина заготовки поблизу крайок до вальцювання, в момент повного дотику валка до поверхні заготовки в поперечному перерізі та після вальцювання.

Величину використаного ресурсу пластичності при вальцюванні лопаток з еквідистантним припуском можна визначити за формулою

$$\psi_u = \ln \frac{C^{кр}}{C_{\lambda}^{кр}} \frac{1}{\lambda \varepsilon_*(\eta=0)}. \quad (4.19)$$

Достовірність розрахунків за формулами (4.18) і (4.19) підтверджена розрахунками величини ψ_u за критеріями, які враховують вплив історії деформування, а також експериментально.

Слід відзначити, що сприятливим еквідистантний припуск є для лопаток з невеликою різницею товщини в поперечному перерізі, коли ступінь деформації поблизу крайок не перевищує більш ніж на 20-30% ступінь деформації посередині поперечного перерізу. При отриманні поблизу крайок відносно більших деформацій даний припуск доцільно використовувати тільки при вальцюванні металів з дуже чутливою пластичністю до схеми напруженого стану. В інших випадках запропоновано використовувати комбінований припуск - пропорційний обтискуванню в зоні найбільших розмірів поперечних перерізів та збільшений поблизу крайок пера до величин, що забезпечують прямолінійність вихідних поперечних перерізів після вальцювання.

Оскільки в процесі експлуатації руйнування лопаток відбувається в зоні, що віддалена від замкової частини на відстань 0,05-0,2 довжини пера лопатки, то деформаційні пошкодження тут мають бути цілком усунуті термообробкою. Для більшості досліджених металів за такий рівень можна прийняти величину використаного ресурсу пластичності $\psi_u \leq 0,4$. На ділянках поблизу кінця пера важливо не допустити руйнування металів при вальцюванні. Тому, якщо вальцювання здійснюється за декілька переходів, обмежуючою тут величиною рекомендується значення $\psi_u \leq 0,7$, а на останньому переході - $\psi_u < 1$.

Висновки. В роботі шляхом моделювання механіки формоутворення заготовок при локальному деформуванні на прикладах процесів штампування обкочуванням і вальцювання визначені шляхи впливу технологічних параметрів на кінематику плину, напружено-деформований стан і деформівність матеріалу заготовок, що дозволяє цілеспрямовано розвивати і вдосконалювати технологічні процеси локального деформування.

ЛЕКЦІЯ №5

РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

5.1. Класифікація процесів отримання заготовок, та загальна характеристика методів штампування-обкочуванням

5.1.1. Штампування обкочуванням – сферо рухоме пресування

Перші відомості про конструкції обладнання з рухом кругового обкочування інструменту з'явилися в 20-х роках минулого століття. Основна ідея патенту фірми VC Massey Ltd (Англія) (застосування сферичної опори інструментотримача з хвостом) була успішно використана згодом у багатьох машинах для штампування обкочуванням.

Радянським винахідником А. Н. Силичевим в 1962 році була запропонована досить проста і надійна конструкція машини для об'ємного штампування обкочуванням, що отримала назву сферорухомого пресування.

Практично одночасно польський вчений З. Марціняк запатентував пристрій для виготовлення виробів хитним інструментом.

У нашій країні перші зразки лабораторного і серійного обладнання були створені у 60-70 р. р. в ЛМІ, ЛПІ, ВПТИ Електро. Вивченням даного процесу займалися та продовжують працювати в Вінницькому національному аграрному університеті, Донбаській державній машинобудівній академії і Київському національному технічному університеті.

Дослідження фізичних і технологічних основ сферорухомого штампування пов'язані з іменами багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених. Завдяки їх роботам з'явилися перші установки для сферорухомого штампування, а отримані результати зацікавили багато промислових підприємства.

Сутність розглянутого процесу представлена на рис. 5.1 та полягає в тому, що загальна деформація відбувається внаслідок локального, послідовного і багаторазового впливу пуансона 2 і матриці 9 на заготовку 1, у результаті чого деформовані ділянки піддаються послідовному пульсуючому навантаженні.

Це досягається за рахунок надання робочому рухомому інструменту (пуансону або матриці) складного механічного руху - кругового коливального від сферорухомого механізму і вертикального поступального від столу або повзуна гідравлічного процесу.

Зона пластичної деформації, яка обумовлена втискуванням інструменту при його вертикальному переміщенні, поступово переміщається в окружному напрямку і поширюється по всьому об'єму заготовки.

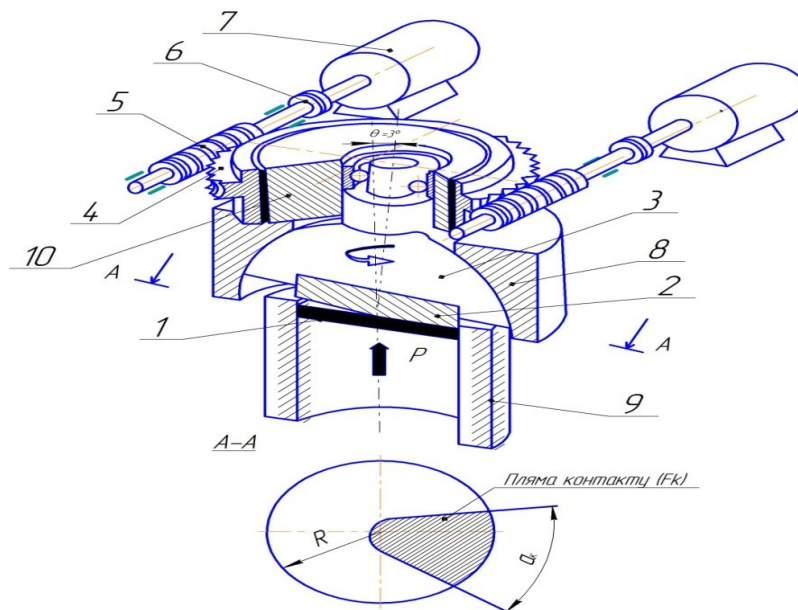


Рис. 5.1. Принципова схема штампування обкочуванням

Локальний характер прикладання навантаження призводить до цілого ряду позитивних переваг, серед яких головними є:

- зменшення потрібного зусилля деформування в 5-10 разів у порівнянні з традиційними методами штампування;
- зменшення величини контактної тертя, за рахунок чого зменшується навантаження на інструмент і, як наслідок, підвищується його стійкість;
- локалізація осередку деформації сприяє збільшенню пластичності металу, що призводить до збільшення ступенів деформації порівняно із звичайним штампуванням;
- можливість обробки у холодному стані деталей, одержуваних раніше механічною обробкою з високою точністю: по полотну - 0,07-0,1 мм і шорсткість R_z 0,63, що дає можливість в 2-3 рази підвищити КВМ і на 15-20%, а в деяких випадках в 2 рази зменшити трудомісткість механічної обробки;
- мала металоємність і габарити устаткування, простота та дешевизна інструменту, що дозволяє зменшити капітальні витрати на устаткування в 3-4 рази, а на оснащення - в 2 рази;
- покращення умов праці і безпеки працюючих, так як обладнання відрізняється безшумністю, не потребує спеціальних фундаментів і є екологічно чистим (відсутні вібрації, загазованість).

Класифікації основних процесів умовно розділена на три групи процесів (рис. 5.2.). Першу групу складають заготовки і одноперехідні процеси:

- а) вирубка обкочувальним інструментом;
- б) штампування обкочуванням плоских заготовок типу «дисків»;
- в) висадка;
- г) штампування деталей складного профілю.

Другу групу становлять процеси, пов'язані з отриманням порожнистих циліндричних виробів:

а), б), в) пряме і зворотнє видавлювання циліндричних заготовок хитним інструментом (пуансоном або матрицею);

г) глибока витяжка з листа, при якій притиску надається коливальний рух.

Третю групу процесів становлять процеси, пов'язані з отриманням порожнистих і трубних виробів у обкатувальній матриці:

а), б) витяг з потоншенням порожнистих циліндричних заготовок;

в) роздача обкочуванням; г) обтиск обкочуванням;

Третій групі процесів, присвячені роботи, що проводяться в Вінницькому національному аграрному університеті (ВНАУ) під керівництвом В. А. Матвійчука.

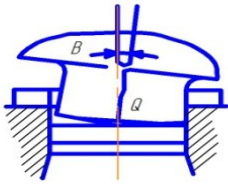
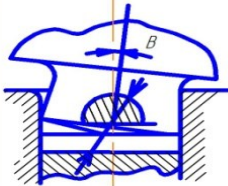
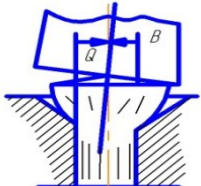
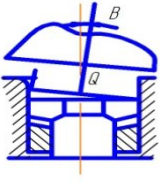
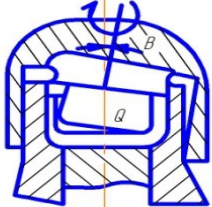
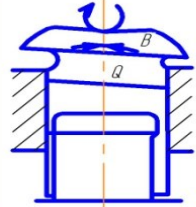
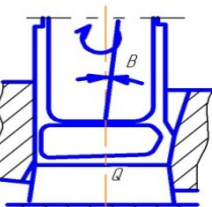
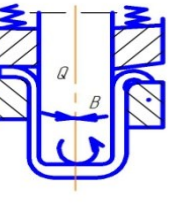
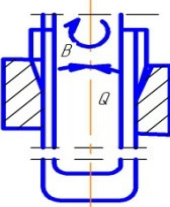
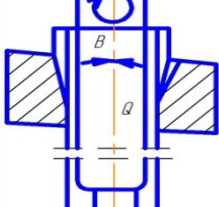
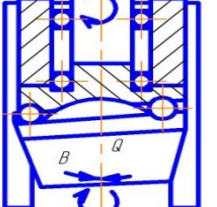
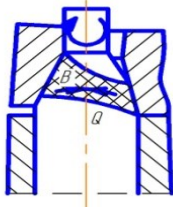
№ пп	Група процесів	Схема процесу			
		а)	б)	в)	г)
1	Заготовчих і одноперехідних				
2	Штампування напівфабрикату				
3	Кінцева обробка порожнистих і трубчастих заготовок				

Рис. 5.2. Класифікатор процесів штампування обкочуванням (сферо рухоме штампування)

5.1.2. Штампування обкочуванням – торцеве розкочування

Особливого розвитку ШО набуло при створенні такого напрямку, як холодне торцеве розкочування (ХТР). Процеси ХТР дозволяють отримати холодним деформуванням вісесиметричні, суцільні і порожнинні вироби складного профілю з тонкостінними елементами значних розмірів. Формозміна заготовок може реалізуватись за наступними схемами (рис. 5.3) осаджування, висадка зовнішніх і внутрішніх буртів на трубчастих заготовках; пряме і зворотнє витискуванням; роздавання, відбуртування, ротаційна витяжка, карбування тощо.

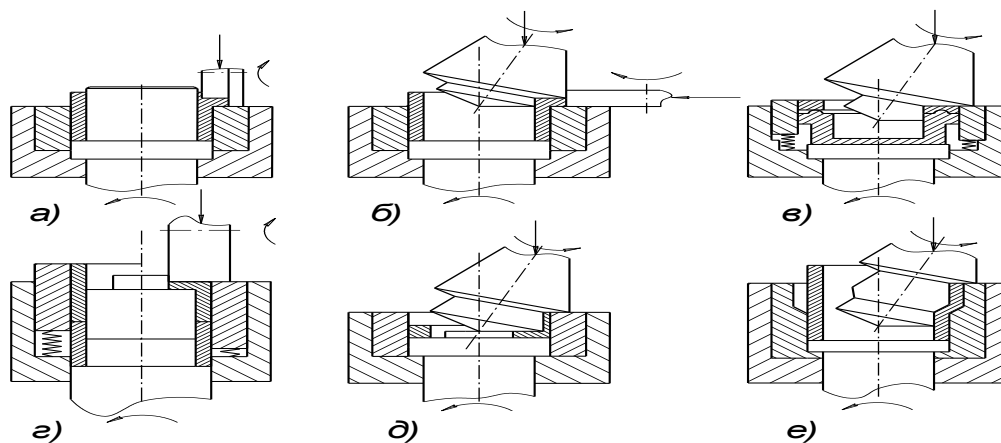


Рис. 5.3. Схеми ХТР: а, б – висадка зовнішнього бурта; в – карбування; г – висадка внутрішнього бурта; д – зворотне витискування; е – роздавання

Технологічні характеристики напівавтоматів для ХТР представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. – Технологічні характеристики напівавтоматів для ХТР

Параметри	Розмірність	Модель		
		КО9013	СО424	САО424
Зусилля деформації	кН	125	250	630
Швидкість обертання матриці	об/хв	125	200	200
Потужність привода обертання	кВт	6	18,5	30
Продуктивність	шт/г	240	150	100
Діаметр вихідної заготовки	мм	60	125	250
Ширина бурта готової деталі	мм	15	25	40
Висота бурта готової деталі	мм	10	15	25
Габаритні розміри верстата				
Довжина	мм	2000	3500	4600
Ширина	мм	2000	1240	2000
Висота	мм	1200	1240	1500
Маса верстата	кг	3000	3600	15000

При ХТР у якості основного деформуючого інструменту використовують валки циліндричної чи конічної форми. Циліндричний валок формує внутрішні та профільні зовнішні бурти за схемою висадки.

Значно більші технологічні можливості забезпечує деформуючий інструмент у вигляді конічного валка, що розташований під кутом до осі обертання деталі. Конічний валок дає можливість формування деталі за схемами висадки, прямого та оберненого видавлювання, роздавання, осаджування, карбування. При деформації конічним валком у ряді випадків можна відмовитись від використання оправки, що спрощує конструкцію оснащення. Недоліками конічного інструменту є складність форми валка та залежність розміру інструменту від розміру деталі.

У якості заготовок для розкочування можна використовувати відрізки труб та прутків, штамповані заготовки та кільця, отримані гнуттям смуг чи прутків із наступним зварюванням. Матеріалом заготовок можуть слугувати сталі: конструкційні – свинець, алюміній, Ст. 3, сталь 20, сталь 40; леговані конструкційні – сталь 20Х, сталь 18ХГТ; шарикопідшипникові – сталь ШХ15; інструментальні – сталь 9ХС, сталь 4Х13 та інші, а також кольорові метали та сплави.

Величина одиничного обтискування визначається необхідним ступенем деформації, силовими параметрами обладнання, розмірами заготовки і механічними характеристиками її матеріалу і може змінюватись від 1-3 мм на початковій стадії деформування до 0.05-0.1 мм на стадії калібрування. Остаточне деформування деталі відбувається, у більшості випадків, за 10-30 обертів або протягом 0.1-0.25 хв. Форма і розміри виробу задаються схемою розкочування і конструкцією обладнання.

Основним параметром, за яким оцінюється придатність металів для обробки методом торцевого розкочування, є достатня пластичність. В ряді схем прямого і зворотного видавлювання та комбінованих схем обмежуючим фактором є величина опору металу пластичному деформуванню, яка лімітується міцністю обладнання.

Основними факторами, що обмежують технологічні можливості процесів ХТР є руйнування матеріалу, викривлення і складкоутворення заготовок.

Деформовність заготовок в реальному технологічному процесі залежить від схеми формозміни, пластичності матеріалу, параметрів процесу і заготовки. Найбільш небезпечними через руйнування схемами є висадка зовнішнього бурта, роздавання та відбуртування трубчастих заготовок.

При висадці зовнішніх буртів гранична до руйнування деформація зменшується із збільшенням відношення висоти виставленої під розкочування частини заготовки до товщини стінки h_0/s_0 . До погіршення умов деформівності приводить зміщення вершини кінцевого валка від осі заготовки у напрямку плями контакту, внаслідок появи в приконтактних шарах заготовки напружень розтягу від дії сили тертя.

На рис. 5.3 показані заготовки з зовнішнім і внутрішнім буртами, отримані за схемою висадки для заготовки з $2 < h_0 / b_0$ при застосуванні ціленаправленого зміщення вершини валка від центра заготовки.

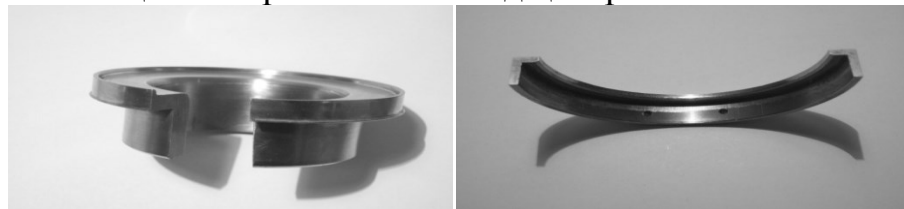


Рис. 5.3. Заготовки з зовнішнім і внутрішнім буртом, отримані висадкою з цілеспрямованим зміщенням вершини кінцевого валка

При розкочуванні трубчастих заготовок за схемою висадки зовнішніх буртів, у випадку $h_0/s_0 > 2...2,5$, відбувається викривлення стінки і

утворення складки, що є технологічним обмеженням процесу через втрату стійкості заготовки. Для уникнення складкоутворення при розкочуванні заготовок із відносною товщиною стінки $s_0/d_0 < 0,1 \dots 0,12$ і відносною вихідною висотою $h_0/s_0 > 3$ формування зовнішніх буртів можна здійснювати за схемою відбуртування. Відбуртовані методом ХТР заготовки показані на рис. 5.4.

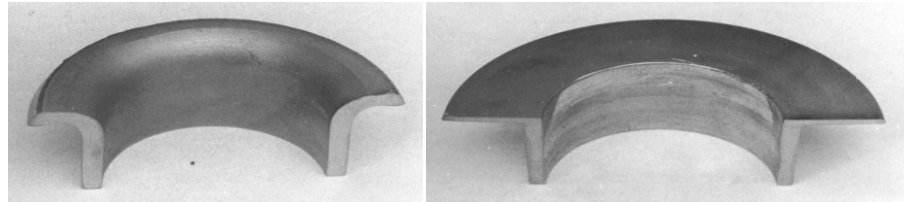


Рис. 5.4. Заготовка, отримана відбуртуванням: на проміжному і заключному етапах

Виключення складкоутворення досягається шляхом зміщення вершини валка від осі заготовки у напрямі плями контакту на величину

$$\delta = \frac{s_0}{(1,5 \dots 2) \cdot \mu} \quad (5.1.)$$

де μ - коефіцієнт тертя на поверхні валок-заготовка.

ШО заготовок за схемою відбуртування супроводжується появою значних напружень розтягу, тому такому виду розкочування можна піддавати матеріали із високою пластичністю, яка характеризується величиною відносного звуження шийки при розтягу зразка $\psi_0 = 60 \dots 65\%$.

Виробництво деталей з сталей 10, 20, та свинцю, алюмінію, показало, що відбуртування розкочуванням дозволяє отримувати якісні бурти значних розмірів, в т.ч. і з товщиною, значно меншою від товщини стінки вихідної заготовки.

Більш сприятливими з позицій деформівності металу є технологічні схеми прямого витискування-калібрування та комбінованого деформування з осаджуванням та зворотнім витискуванням. За першою схемою отримані кільця упорних підшипників та деталі кулачкових муфт (рис. 5.5.).

Заготовкою в даному випадку служить кільце, отримане вирубкою з листа на штампі або відрізане від труби. Матеріал кільця підшипника – підшипникова сталь. Застосування конічного валка з $\alpha < 10^\circ$ дозволяє зменшити відцентровий плин матеріалу і інтенсивність утворення зовнішнього облою. В процесі розкочування формується доріжка тіл кочення, торцеві поверхні з фасками, зовнішній і внутрішній діаметри по 8-9 квалітету точності. Шорсткість поверхні доріжки кочення $Ra=0,2-0,4$ мкм, решти поверхонь $Ra=0,8-2,5$ мкм. Час розкочування 30-60 сек.

На рис. 5.6 показані вироби, отримані за технологічною схемою осаджування зі зворотнім витискуванням.



Рис. 5.5. Схема прямого витискування-калібрування і вигляд отриманих заготовок: 1 - заготовка, 2 - обойма, 3 - матриця, 4 - оправка, 5 - валок, 6- виштовхувач

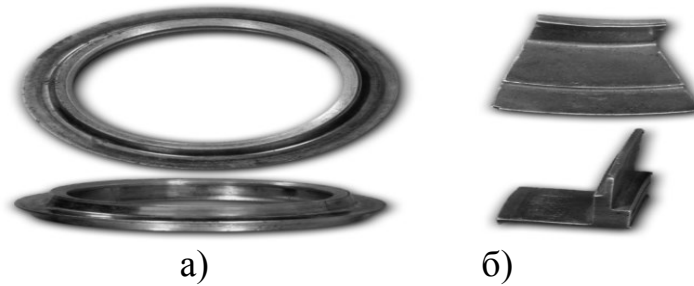


Рис. 5.6. Складно профільовані вироби, отримані розкочуванням циліндричним валком: а) фланець з комірцем; б) елемент корпусу електровакuumного пристрою

Таким чином, цілеспрямовано застосовуючи різні технологічні схеми ШО можна отримувати якісні вироби різної форми, а використовуючи підхід на основі критеріїв деформівності – визначати придатність матеріалу для обробки та граничні розміри виробів.

5.2. Розробка та дослідження процесів виготовлення складно профільних заготовок методом штампування обкочуванням

Значною мірою вирішувати проблеми виготовлення складно профільних заготовок дозволяє процес штампування обкочуванням (ШО). При цьому необхідний профіль заготовки можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем із використанням конічних або циліндричних валків. Особливо ефективним інструментом управління механікою формозміни заготовки є розроблені нами шляхи управління плином металу через зміну взаємного положення валка і заготовки. Метою даної роботи є розробка і реалізація схем прямого і зворотного витискування методом ШО і оцінка деформовності матеріалу складно профільних заготовок для запобігання браку від руйнування та забезпечення високих службових характеристик виробів.

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом ШО.

На рис. 5.7 показані технологічні схеми, з використанням яких нами досліджувалася можливість формувати елементи складно профільних заготовок.

Схема на рис. 5.7,а дозволяє здійснювати комбіноване деформування, яке полягає у зворотному витискуванні вертикального тонкостінного елемента, прямому витискуванню вертикального нижнього елемента та висаджуванні фланця. Інтенсивність течії металу у тому чи іншому напрямі залежить від положення плями контакту валка із заготовкою по відношенню до меридіонального перерізу заготовки.

Схема на рис. 5.7,б забезпечує висаджування фланця та зворотне витискування тонкостінного елемента і реалізується при зміщенні вершини валка у напрямку зони деформації ($\delta > 0$, див рис. 5.7,б). При зміщенні вершини валка за вісь заготовки, по відношенню до зони деформації ($\delta < 0$), можна забезпечити течію матеріалу фланця всередину заготовки.

Реалізація обкочування за схемою на рис. 5.7,в забезпечує операцію осаджування заготовки та прямого витискування або калібрування зі сторони, протилежної валку.

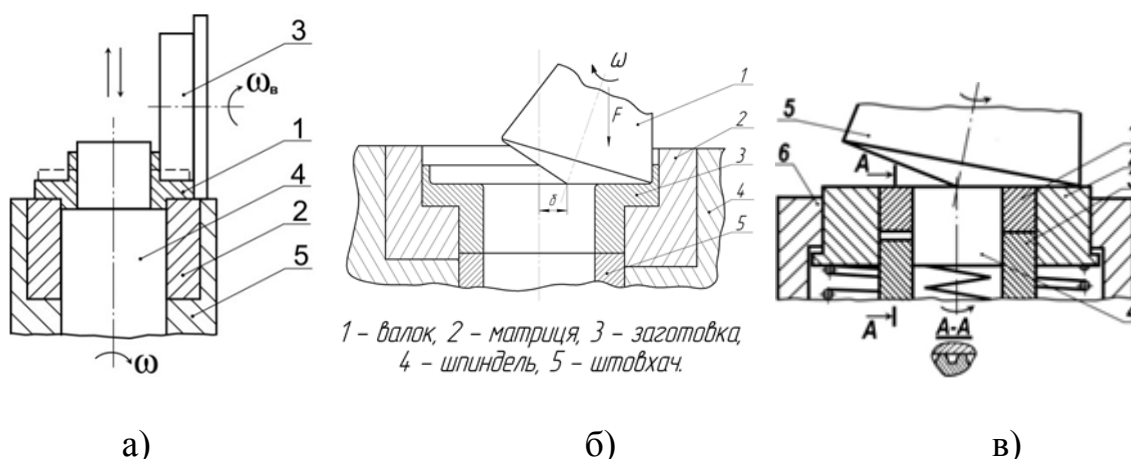
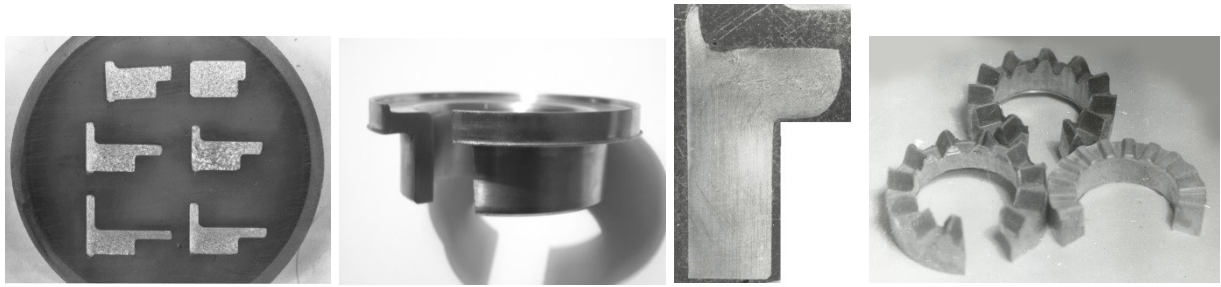


Рис. 5.7. Схеми штампування обкочуванням кільцевої заготовки циліндричним і конічним валками

На рис. 5.8 показані заготовки, що виготовлені за відповідними схемами рис. 5.7.

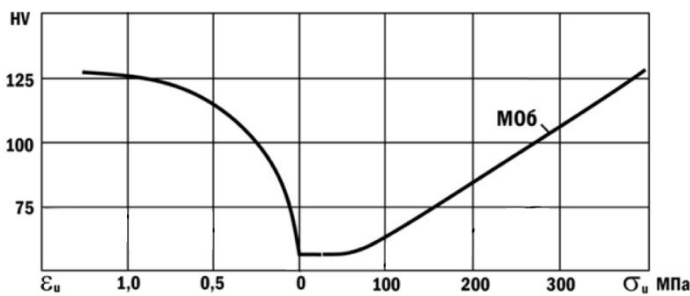
Операція пряме витискування методом ШО була реалізована нами для виготовлення зубчастої муфти, технологічна схема якої представлена на рис. 5.7,в, а вигляд муфти на різних стадіях формування – на рис. 5.8,г. В якості матеріалу заготовки була використана мідь М0б.

Для оцінки технологічних можливостей даних технологічних схем ШО були побудовані для міді М0б градувальний графік в координатах «інтенсивність деформацій (ε_i) – твердість (HV) – інтенсивність напружень (σ_i)» рис. 5.9 і крива граничних деформацій рис. 5.10. Тут $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$ - показник напруженого стану, $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ - перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень.

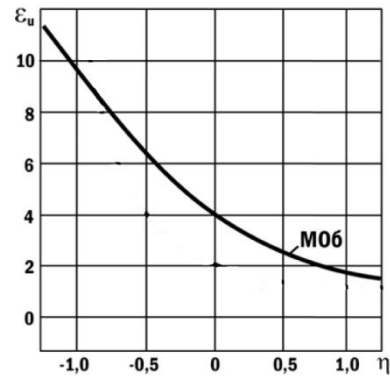


а) б) в) г)

Рис. 5.8. Загальний вигляд і перерізи заготовок, сформованих методами ШО за схемами прямого і зворотного витискування: а) перерізи заготовок із міді М0б, деформованих до різних ступенів за схемою 1,а; б) заготовка із сталі 14Х17Н2, сформована за схемою 1,б; в) переріз заготовки із сталі 30ХГСА, деформованої за схемою аналогічною 1,б, але з формуванням внутрішнього бурта; г) заготовки із міді М0б, деформовані до різних ступенів за схемою 1,в



а)



б)

Рис. 5.9. Градувальний графік міді М0б Рис. 5.10. Крива граничних деформацій М0б

Використання мідних заготовок обґрунтовано можливістю достатньо точно визначати до значних ступенів деформації за результатами вимірювання твердості HV не лише інтенсивність напружень (σ_i), але і інтенсивність деформацій (ε_i).

Аналіз НДС матеріалу муфт проводили із використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу.

На рис. 5.11 приведено вигляд здеформованої ділильної сітки і мікроструктури сформованого елемента кулачкової муфти

На рис. 5.12 приведений характер розподілу інтенсивності деформацій ε_i і показника напруженого стану η по елементу заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях.

Дослідження НДС матеріалу заготовки проводили методом вимірювання твердості. Розподіл інтенсивності деформацій в зоні витиснутого елемента (див. рис. 5.12), отриманий методом вимірювання

твердості, свідчить про досить нерівномірний характер деформованого стану в перерізі заготовки.

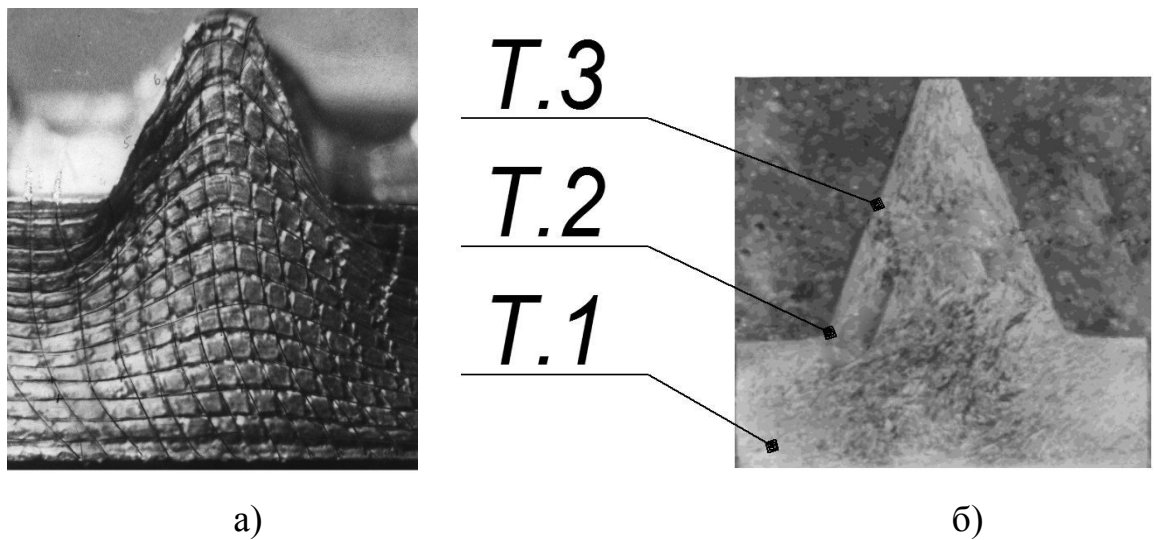


Рис. 5.11. Вигляд zdeформованої ділильної сітки і мікроструктури елемента кулачкової муфти

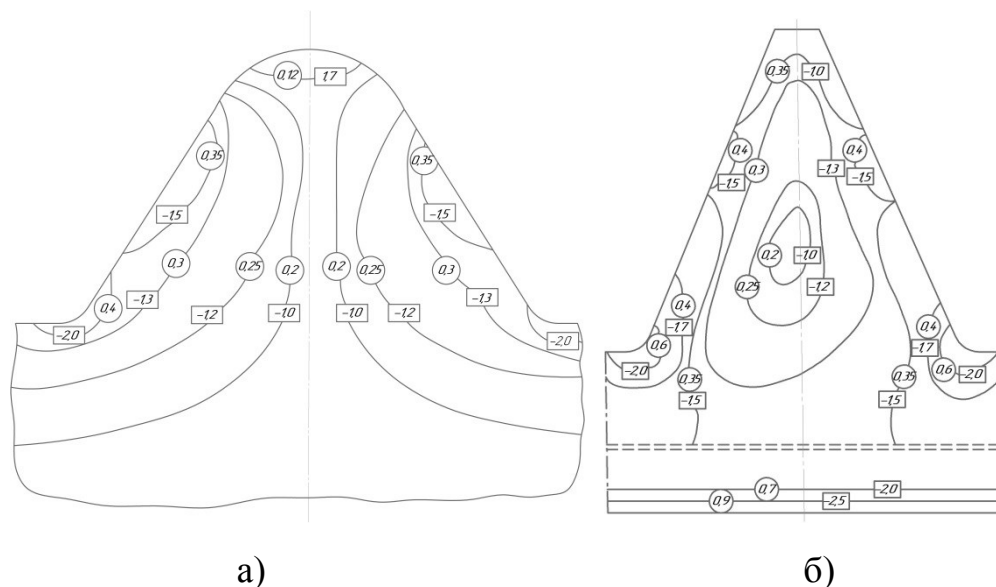


Рис. 5.12. Характер розподілу параметрів НДС по елементу заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях: $\eta = const$ (\square) і $\varepsilon_i = const$ (\circ)

Найбільша інтенсивність деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка з заготовкою, сягає значень $\varepsilon_i = 0,9-1,0$ та може їх перевищувати. Наступною, найбільш zdeформованою, є зона входу металу в формоутворюючий канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень $\varepsilon_i = 0,6-0,7$. Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень $\varepsilon_i = 0,1-0,2$.

Для дослідження НДС пластичної зони заготовки при прямому витискуванні методом ШО нами застосовано також метод координатних

подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R -функцій. При цьому здійснювалося поетапне витискування елемента - плоска задача. Характер розподілу ізоліній $\varepsilon_i = const$ в зоні витиснутого елемента, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. Показник напруженого стану в зоні максимальних деформацій становить $\eta = -2,5 \dots -2,0$ (див. рис. 5.12). Ці умови свідчать про наявність тут значних напружень стиску, що робить відносно безпечною деформовність матеріалу заготовки. Проте на ділянках поблизу основи зуба виникає небезпека руйнування інструментального оснащення. Матеріал заготовки у вершини зуба підлягає відносно невеликим деформаціям, проте показник напруженого стану тут $\eta > +1$, що вимагає проведення оцінки деформовності матеріалу.

Важливою особливістю даної технологічної схеми є те, що частки металу з вільної вершини зуба і «жорсткої» схеми напруженого стану, в процесі витискування переходять на контакт з інструментом, де їх деформації продовжують зростати в умовах «м'якої» схеми напруженого стану ($\eta = -1,3 \dots -1,5$). Все це слід враховувати при побудові шляхів деформування часток матеріалу заготовки, для оцінки його деформовності.

До особливостей деформування відноситься також те, що як видно з рис. 5.11 і 5.12, НДС по відношенню до профілю витиснутого елемента має певну асиметрію. Це пов'язано із асиметричним прикладенням навантаження при обкочуванні заготовки. Такий характер плину є корисним, якщо бічні поверхні елемента мають різні кути нахилу. При необхідності усунення відзначеної асиметрії слід передбачити реверсування заготовки.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 5.13, значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану будуть дещо змінюватися, проте характер їх розподілу зберігатиметься. Зберігатиметься також характер розподілу відзначених величин і при зміні матеріалів, якщо умови тертя залишатимуться незмінними.

Для оцінки деформовності матеріалу заготовки та визначення граничних, з точки зору запобігання руйнуванню матеріалу або забезпечення необхідних технічних характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 8 приведені шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії R -функцій.

Особливість шляхів деформування полягає у тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$. При цьому величина інтенсивності деформацій є незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$. В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування продовжується в умовах $\eta = -1,0 - 1,5$. Для найбільш деформованої приконтрктної з валком зони заготовки шлях

деформування 3 можна представити за середнім в зоні натискання валка значенням показника $\eta = -2,5 \dots -2$.

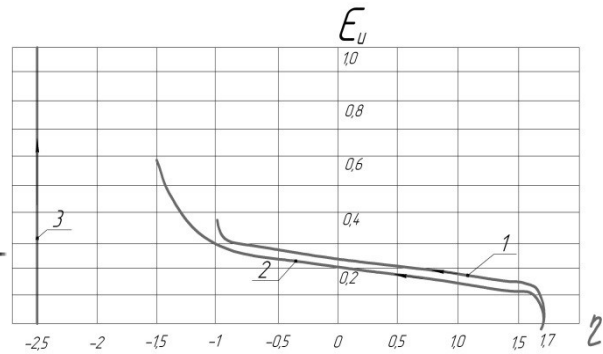
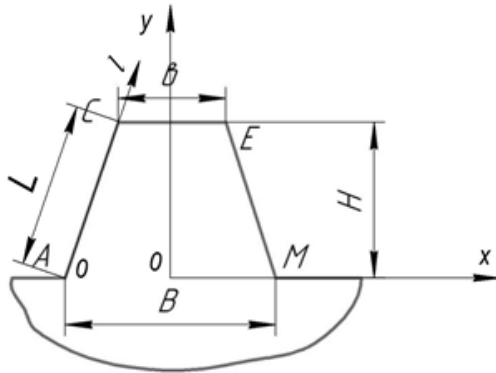


Рис. 5.13. Характерні параметри профілю елемента, що витискується

Рис. 5.14. Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході в формоутворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

З метою оцінки деформовності заготовки необхідно застосувати один із критеріїв деформовності. Для побудови математичної моделі шляхи деформування слід представити в аналітичному вигляді.

Вказані шляхи деформування не є однозначними функціями типу $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\eta)$, проте їх можна представити однозначними функціями виду:

$$\eta = \eta(\varepsilon_i). \quad (5.2)$$

Схематичний графік функції, що апроксимує вказані шляхи деформування, показано на рис. 5.14, а її структура має вигляд:

$$\eta = \begin{cases} 1,7, & \varepsilon_i \leq \varepsilon_1 \\ 1,7 - \dots, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_2 \\ -1,0, & \varepsilon_i > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (5.3)$$

де ε_1 - значення інтенсивності деформацій часток металу вільної зони вершини зуба в момент переходу на контакт з інструментальним оснащенням. Відповідно до рис. 8 можна прийняти $\varepsilon_1 = 0,15$; $\varepsilon_2 = 0,3$ - координати точки переходу від другої до третьої стадії деформування.

Третя стадія деформування є калібрувальною операцією, яка відрізняється незначним зростанням деформацій, а отже на вичерпання ресурсу пластичності практично не впливає.

Для оцінки деформованості матеріалу заготовки використаємо критерій В. Огороднікова:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \left(1 + 0.2 \cdot \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right) \right) \cdot \frac{\varepsilon_i^{0.2 \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)}}{\varepsilon_*(\eta)^{0.2 \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)}} d\varepsilon_i < 1, \quad \bar{\varepsilon}_i < \varepsilon_*, \quad (5.4)$$

$$\psi(\varepsilon_*) = \int_0^{\varepsilon_*} \left(1 + 0.2 \cdot \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right) \right) \cdot \frac{\varepsilon_i^{0.2 \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)}}{\varepsilon_*(\eta)^{0.2 \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)}} d\varepsilon_i = 1, \quad (5.5)$$

де ε_* - гранична пластична деформація для шляху деформування (5.2);
похідна $\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}$ знаходиться диференціюванням (5.2).

Для (5.4) матимемо:

$$\frac{d\eta}{de_u} = \begin{cases} \frac{s}{e_1} \cdot \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0), & e_i \leq e_1 \\ \pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)), & e_i > e_1 \end{cases} \quad (5.6)$$

Отже, з урахуванням (5.5), критерій (5.6) набуває вигляду:
при $e_p \leq e_1$

$$\psi(e_p) = \int_0^{e_p} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) - 1}}{\varepsilon_{*c} \left[\eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1 \quad (5.7)$$

при $e_p > e_1$



(5.8)

де

$$\varepsilon_{*c}(\eta) = \varepsilon_*(\eta=0) \cdot \exp \left[-\eta \cdot \ln \left(\frac{(1-\eta) \cdot \varepsilon_{*c}(\eta=-1)}{2 \cdot \varepsilon_{*c}(\eta=0)} + \frac{(1+\eta) \cdot \varepsilon_{*c}(\eta=0)}{2 \cdot \varepsilon_{*c}(\eta=1)} \right) \right], \quad (5.9)$$

$$h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left(\frac{s}{e_1} \cdot \left(\frac{e_u}{e_1} \right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right) \quad (5.10)$$

$$h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left(\pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)) \right) \quad (5.11)$$

$\varepsilon_{*c}(\eta = -1)$, $\varepsilon_{*c}(\eta = 0)$, $\varepsilon_{*c}(\eta = 1)$ - гранична пластична деформація за умов рівномірного стиску, зсуву та розтягу відповідно.

Проведемо оцінку деформованості матеріалу заготовок при операціях висаджування і зворотного витискування методом ШО

На рис. 5.15 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень $\sigma_i = const$ і деформацій $\varepsilon_i = const$, що отримані за результатами вимірювання твердості в перерізах заготовок на різних стадіях обкочування.

Таким чином, в сформованому на першій стадії обкочування перерізі заготовки (рис. 5.15, а) можна виділити наступні характерні зони розподілу НДС:

- найбільш деформованою є зона тонкостінного елемента 1, яка формується у результаті плину металу із зони 2. Незначне подальше деформування зони 1, при збільшенні висоти тонкостінного елемента, (рис. 10, залежність 1) відбувається за рахунок послідовних циклічних зсувів в осьовому напрямі, обумовлених особливостями локального навантаження при обкочуванні, та посиленні опору плину металу в зазор між валком і оправкою;

- зона 2, де найбільша степінь деформації спостерігається на контакт з валком (поверхня А), яка поступово зменшується в міру віддалення від контактної поверхні. Метал при цьому із зони 2 (рис. 5.15,в) поступає в зони 1 і 3, а інтенсивність його плину у тому чи іншому напрямі залежить від взаємного розташування валка і заготовки;

- зона 3 – фланцева частина заготовки, є зоною відносно рівномірної деформації. Зростання інтенсивності деформацій на периферії фланця, у залежності від відносного збільшення його довжини, приведена на рис. 5.16 лінією 2.

Розподіл показника напруженого стану η по довжині дуги контакту в середній частині фланця і вздовж контуру заготовки, що формується валком, представлено на рис. 5.17. Таким чином, в зоні з найбільшою інтенсивністю деформацій спостерігається схема напруженого стану, що приблизно відповідає двовісному стиску ($\eta \approx -2$).

Використання металів з більш високим опором пластичному деформуванню σ_s , а також збільшення одиничного обтискування Δh приводить до зростання рівня напружень, проте не чинить помітного впливу на показник η .

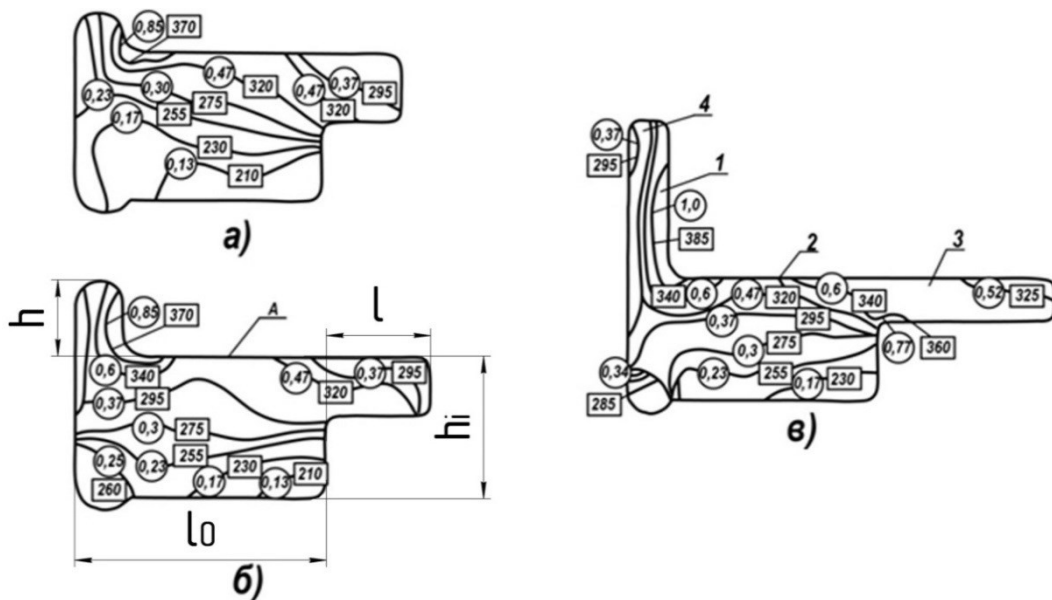


Рис. 5.15. Розподіл ізоліній $\varepsilon_i = const$ (○) і $\sigma_i = const$ (□) в перерізах сформованих ШО кільцевих заготовок з міді М0б

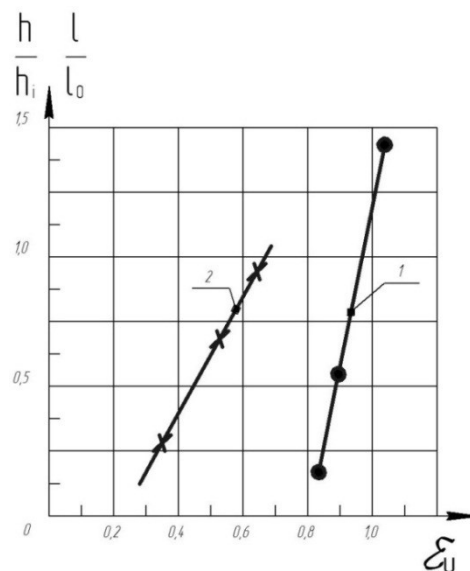


Рис. 5.16. Залежність відносної зміни висоти тонкостінного елемента h/h_i від максимальної інтенсивності деформацій (1) та відносного розміру фланця l/l_0 від інтенсивності деформацій на його периферійній ділянці (2) відповідно до рис. 5.15

Слід відзначити, що в зоні формування максимальних деформацій в тонкостінному елементі має місце «м'яка» схема напруженого стану ($\eta < -1,5$). Більш жорстка схема напруженого стану має місце у фланцевій частині заготовки, а саме на периферійній, вільній від контакту з інструментом поверхні (рис. 5.17). Тому оцінку деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій ε_* або величини використаного ресурсу пластичності ψ_B , слід проводити саме для цієї зони.

Оцінку доформовності проводили на основі феноменологічної теорії, для чого були побудовані криві граничних деформацій і шляхи деформування часток металу небезпечної зони заготовки в координатах « $\varepsilon_i - \eta$ ».

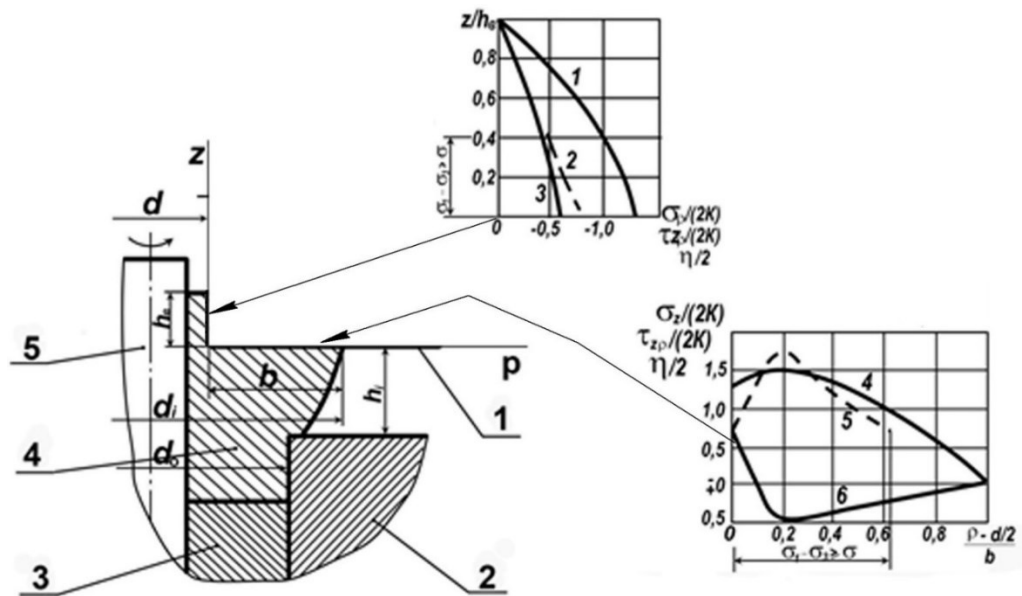


Рис. 5.17. Розподіл показника напруженого стану по висоті тонкостінного елемента і по ширині фланця

На рис. 5.18 представлені криві граничних деформацій трьох сталей і шляхи деформування часток металу вільної поверхні фланця при його висаджуванні, у залежності від параметрів процесу ШО.

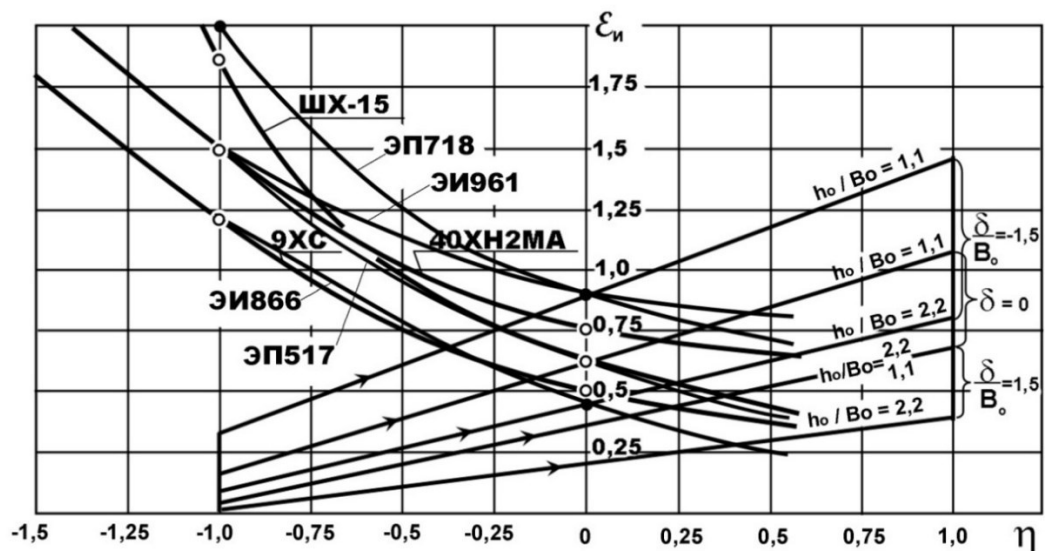


Рис. 12. Криві граничних деформацій сталей $\text{---}\circ\text{---}$ і шляхи деформування $\text{---}\rightarrow\text{---}$ вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО (h_0, b_0 - вихідна під обкочування висота і товщина стінки трубної заготовки, δ - величина зміщення вершини кінцевого валка від осі заготовки (див. рис. 5.7,б))

Використовуючи отриманий критерій можна розрахувати величину використаного ресурсу пластичності матеріалу заготовки, що підлягала висаджуванню методом ШО.

На основі критерію нами отримано співвідношення для визначення граничного діаметра фланця d_* :

$$d_* = d_0 \exp \left\{ 0,865 \varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w - 0,14 [\varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w]^2 \right\}, \quad (5.12)$$

де d_0 – вихідний діаметр заготовки; $\varepsilon_*(\eta = 0)$ - гранична деформація при крученні; η_k - значення показника η в точці перетину шляху деформування часток матеріалу вільної поверхні фланця з кривою граничних деформацій; $\lambda = \varepsilon_*(\eta = -1) / \varepsilon_*(\eta = 0)$ - показник чутливості пластичності матеріалу до схеми напруженого стану; $\varepsilon_*(\eta = -1)$ - гранична деформація при одновісному стиску; w - коефіцієнт впливу історії деформування на пластичність, при висаджуванні фланців методом ШО, $w = 1,2 \dots 1,35$.

В таблиці 5.2 приведені значення граничних деформацій і відносних граничних діаметрів фланців, сформованих при різних параметрах технологічного процесу ШО.

Таблиця 5.2 – Значення граничних деформацій і відносних граничних розмірів заготовок при висаджуванні фланців методом ШО

№ пор	Марка сталі	Рівняння шляху деформування							
		$\eta = 1,6 \varepsilon_i - 1,5 \left(\begin{array}{l} \frac{\delta}{b_0} = -1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,1 \end{array} \right)$		$\eta = 2,5 \varepsilon_i - 1,25 \left(\begin{array}{l} \delta = 0 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,5 \end{array} \right)$			$\eta = 5 \varepsilon_i - 1 \left(\begin{array}{l} \frac{\delta}{b_0} = +1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 2,2 \end{array} \right)$		
		ε_*	d_* / d_0	ε_*	d_* / d_0	h_* / h_0 (no ε_i^{\max})	ε_*	d_* / d_0	h_* / h_0 (no ε_i^{\max})
1.	9ХС	0,86	1,90	0,6 5	1,65	6,4	0,3 9	1,37	3,7
2.	ШХ-15	1,00	2,06	0,7 3	1,74	32,8	0,4 1	1,39	9,0
3.	40ХН2М А	1,03	2,10	0,8 0	1,83	8,6	0,5 6	1,55	5,1

Матеріали з похилою кривою граничних деформацій при недостатній пластичності можуть руйнуватися не на вільній поверхні фланця, а в зоні з максимальною інтенсивністю деформацій, яка проходить по всій висоті фланця на відстані b_0 від внутрішньої поверхні вихідної трубної заготовки. В цьому випадку допустиму ступінь формозміни необхідно перевіряти також за граничним ступенем осаджування фланця:

$$h_0/h_* = \exp[\varepsilon_*(\eta = 0)\exp(1,5 \ln \lambda)]. \quad (5.13)$$

Значення граничного ступеня осаджування для заготовок з досліджуваних сталей приведені в табл. 5.2.

За визначеними величинами інтенсивності деформацій можна для кожного з матеріалів заготовки встановити значення інтенсивності напружень, що в сукупності із встановленим напруженим станом на контакті заготовки і інструменту дозволяє оцінити міцність і стійкість інструменту.

1. В роботі проведено розробку і дослідження технологічних схем висаджування, прямого і зворотного витискування методом штампування обкочуванням, в результаті чого доведено, що даний процес дозволяє отримувати складнопрофільні заготовки високої якості.

2. Цілеспрямоване взаємне розташування обкочувального валка і заготовки забезпечує направлений плин і сприятливий напружено-деформований стан матеріалу та надає можливість досягнення значних розмірів різних елементів заготовки.

3. Операції висаджування, осаджування, зворотне витискування супроводжуються сприятливим напружено-деформованим станом і дозволяють отримати геометрично розвинуті елементи заготовки, в т.ч. і тонкостінні. Можливості прямого витискування обмежені складністю передачі зусилля від валка на протилежну торцеву частину заготовки, та значними контактними напруженнями. Тому дана операція підходить більш для здійснення калібрування або формування незначних за розміром елементів заготовки.

4. За результатами дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок в процесах ШО, побудови кривих граничних деформацій та з використанням феноменологічних критеріїв проведена оцінка деформовності матеріалів для небезпечних зон заготовок. Визначена величина використаного ресурсу пластичності для проміжних ступенів деформацій, а також граничних (без руйнування) розмірів заготовок.

ЛЕКЦІЯ №6 РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ

6.1. Суть та особливості застосування методів ротаційної витяжки

Методами ротаційної витяжки (РВ) можна виготовляти порожнисті осесиметричні деталі машин, приладів, апаратів, атомних реакторів, обіддя коліс автомашин і тракторів, дифузори вентиляторів, різні посудини, ковпаки коліс, алюмінієві колби, прецизійні трубки, рефлектори, обтічники, газові балони, кришки підшипників, молочні бідони, радіолокаційні відбивачі, келихи, декоративні вази і чаші, деталі апаратів для дослідження космічного простору та інші порожнисті вироби, що мають форму, аналогічну показаним на рис. 6.1.

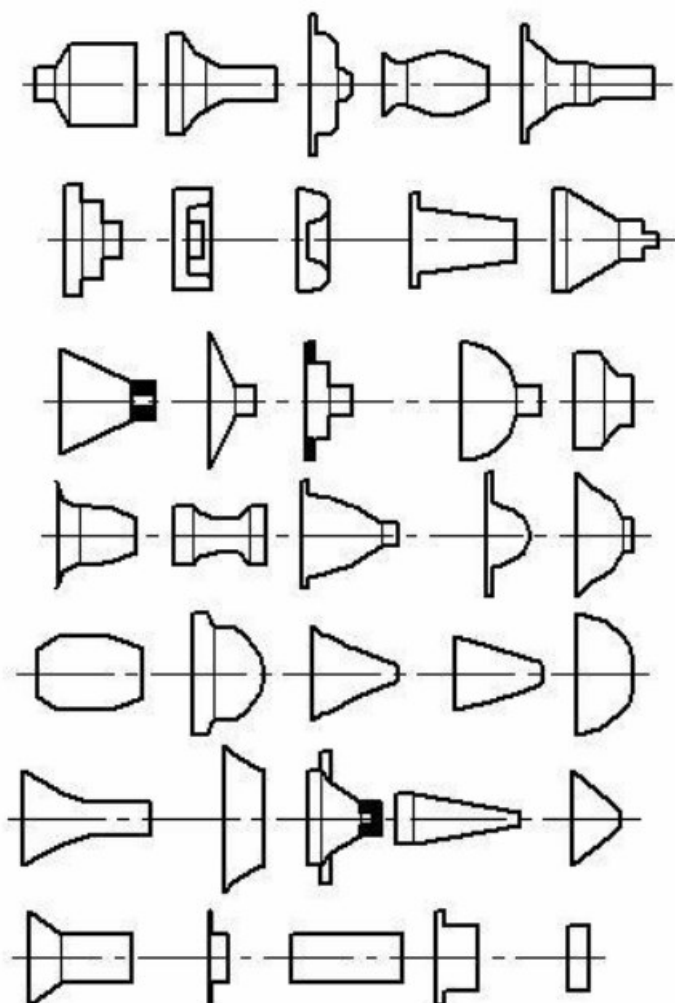


Рис. 6.1. Деталі, що виготовляються ротаційної витяжкою

Поряд із зазначеними перевагами РВ має недоліки і обмеження, які необхідно враховувати при виборі методу виготовлення порожнистих деталей. До недоліків слід віднести недостатню вивченість процесу і складність розрахунку режимів формоутворення; необхідність спеціального навчання робітників, наладчиків і технологів; підвищену складність

налагодження і настроювання автоматизованих токарно-давильних верстатів в порівнянні з пресами.

Структурна схема експериментальної установки наведена на рис. 6.2.

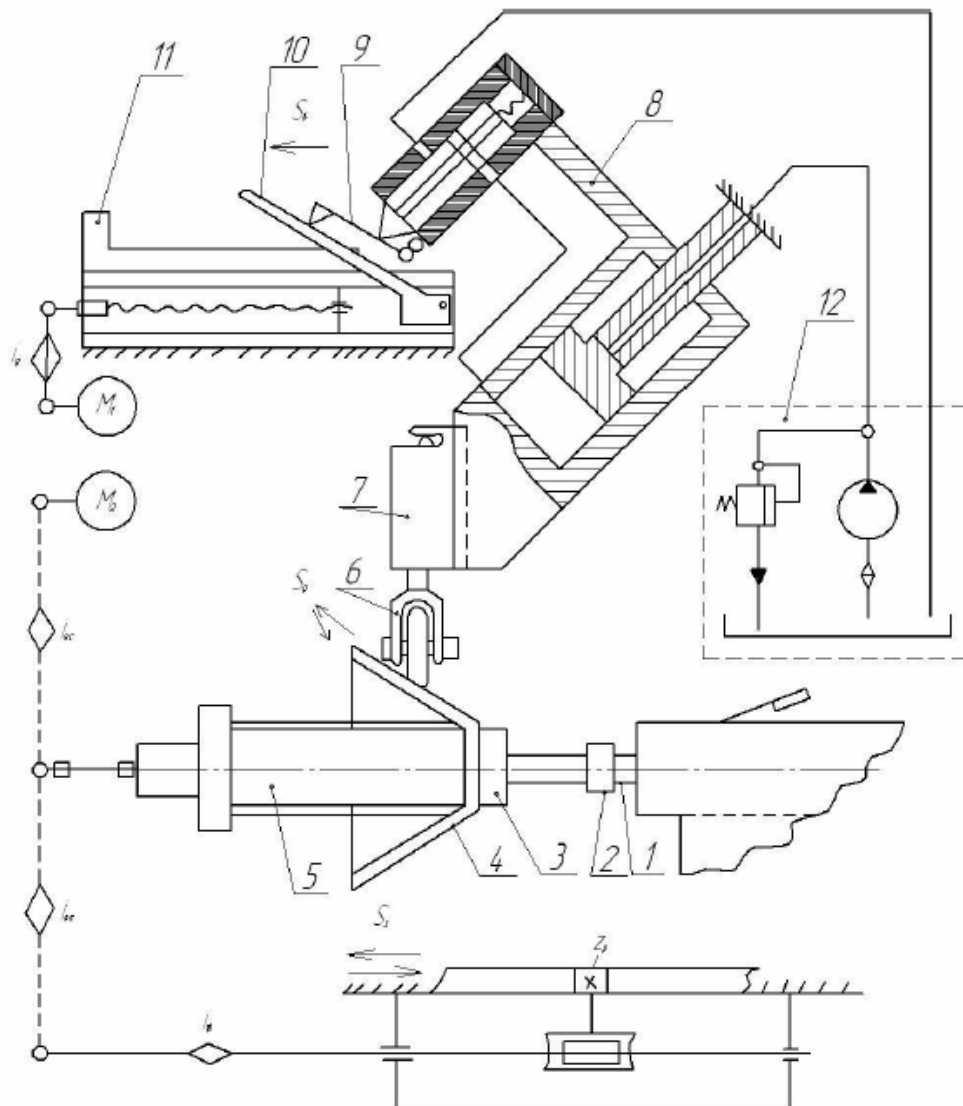


Рис. 6.2. Структурна схема експериментальної установки

Задані траєкторії руху інструменту 6, встановленого в динамометр 7, забезпечували гідрокопірувальним супортом 8 за допомогою щупа 9, який переміщається одночасно по рухомому 10 і нерухомому 11 копірах.

Ротаційну витяжку оболонок проводять при русі інструмента 6 з радіусом при вершині R_r в прямому і зворотному напрямках по траєкторіях, показаних на рис. 6.2 штрихпунктирними лініями. Величина деформації при РМВ з конічних заготовок збільшується протягом кожного проходу і виражається порівняно громіздкою залежністю, яку складно застосовувати для характеристики інтенсивності деформування при налаштуванні верстата в виробничих умовах.

Рухи при РВ за цільовим призначенням ділять на формоутворюючі та допоміжні. Крім того, рухи інструменту і заготовки ділять на головний рух і

рух подачі. Головним називають такий рух, який забезпечує пластичне деформування металу з певною швидкістю. Рухом подачі називають такий рух, який дозволяє підвести під робочу кромку інструмента нові ділянки заготовки і тим самим забезпечити витяжку оболонки.

Головний рух і рух подачі можуть бути обертальними і прямолінійними. Вони можуть відбуватися як заготовкою, так і інструментом. Головний рух і рух подачі є формотворчими.

При наявності двох формотворчих рухів один буде головним, інший - рухом подачі. Якщо формотворчих рухів більше двох, то одне з них буде головним, а інші - рухами подачі.

6.2. Розрахунок швидкостей обертання інструменту та заготовок

При РВ циліндричної оболонки головному оберտальному руху відповідає лінійна швидкість рівномірного переміщення точок осередку деформації по поверхні оброблюваної заготовки

$$V_{Bp} = \frac{\pi B n}{1000}. \quad (6.1)$$

Поздовжній і поперечний рух інструменту вимірюються швидкістю подачі в хвилину, так званої хвилинною подачею або подачею на оборот шпинделя. Зв'язок між хвилинною подачею $S_{xв}$ і подачею на оборот $S_{об}$ така:

$$S_{xв} = S_{об} \cdot n. \quad (6.2)$$

Швидкість РВ $V_{вит}$ дорівнює геометричній сумі швидкості обертання заготовки у осередку деформації і швидкості подачі, причому вектор швидкості подачі як швидкість іншого тіла повинен бути відкладений у зворотний бік (рис. 6.3).

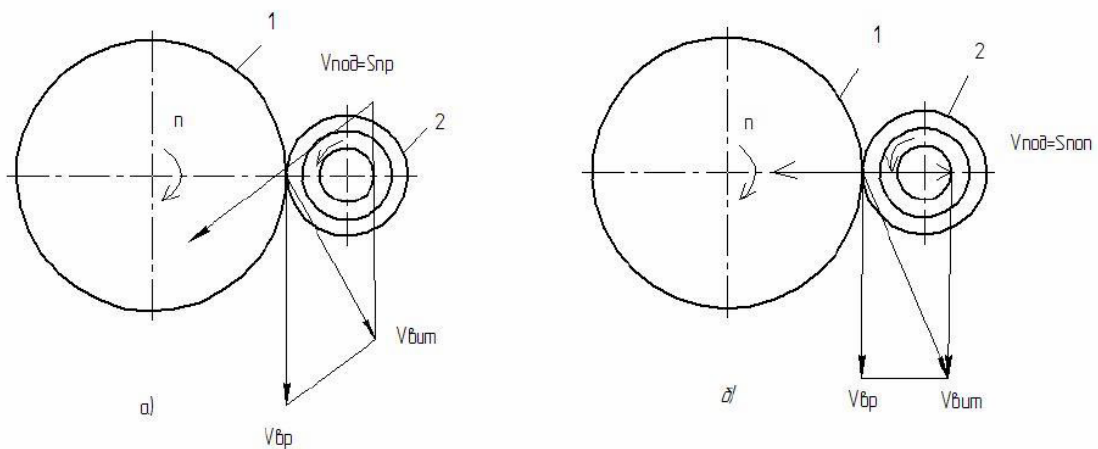


Рис. 6.3. Вектори швидкостей обертання $V_{вр}$, витяжки $V_{вит}$ і подачі $V_{под}$: а - при поздовжній подачі; б - при поперечній подачі; 1 - обертається заготовка; 2 – давильний ролик

При РВ циліндричної оболонки вектор швидкості обертання заготовки $V_{вр}$ перпендикулярний вектору швидкості подачі $V_{под}$ тому

$$V_{вум} = V_{вр} + V_{под} \text{ чи } V_{вум} = \frac{1}{1000} \sqrt{(\pi D)^2 S_{np}^2}. \quad (6.3)$$

Напрямок вектора швидкості витяжки (див. рис. 6.3) визначається кутом μ :

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{V_{под}}{V_{вр}} = \frac{S_{np}}{\pi D}. \quad (6.4)$$

При РВ циліндричних поверхонь:

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{V_{под}}{V_{вр}}. \quad (6.5)$$

Це співвідношення може коливатися в широких межах і залежить від гранично допустимих швидкостей обертання заготовки і подач, що визначаються потужністю і кінематикою верстата, розмірами і формою оброблюваних деталей, необхідною шорсткістю поверхні, необхідною продуктивністю та іншими технологічними факторами.

При поздовжній подачі вектор швидкості витяжки буде лежати в площині, що проходить через вектор швидкості обертання і напрям поздовжньої подачі (рис. 6.3, а). При поперечній подачі вектор швидкості витяжки лежить в площині яка проходить через вектор швидкості обертання і напрям поперечної подачі (рис. 6.3, б).

Ефективність РВ по кінематичним параметрами може характеризуватися продуктивністю формоутворення за один хід давильного інструменту

$$Q_{\phi} = \frac{L}{n \cdot S_{x\phi}}, \quad (6.6)$$

де Q_{ϕ} - продуктивність формоутворення за один перехід, мм/хв. При МРВ продуктивність формоутворення може бути визначена за формулою

$$Q_{\phi.общ} = \sum_1^n Q_{\phi}, \quad (6.7)$$

де $Q_{\phi.общ}$ - загальна продуктивність формоутворення, мм/хв; k - число переходів давильного інструменту до повного формоутворення оболонки.

Основними факторами, що обмежують подачу, є шорсткість оброблюваної поверхні, діапазон задання подач, гранична швидкість

стеження і умови сталого протікання процесу формоутворення, які враховують при розробці технології.

У всіх випадках подача повинна бути сумарною з величиною осередку деформації, тому що в протилежному випадку порушуються умови, що визначають можливість РВ.

Шорсткість поверхонь оболонок, одержуваних на АТДВ з копіювальними системами, залежить від типу копіювальної системи і форми поверхні, від характеру переміщення давильного інструменту і від положення інструмента по відношенню до оброблюваної поверхні. Це ж відноситься і до верстатів з ЧПК.

Висота нерівностей поверхні циліндричної оболонки після РВ на АТДВ визначається наступним шляхом. Припустимо, висота нерівності (рис. 6.4) $H=AC=OA-OC$; при цьому $OA = R_r$, а OC визначається з ΔOCD , де

$$OC = \sqrt{(OD)^2 - (CD)^2} = \sqrt{R_r^2 - \frac{S^2}{2}} \quad (6.8)$$

Тому

$$H = AC = R_r - \sqrt{R_r^2 - \frac{S^2}{2}} \quad (6.9)$$

Нехтуючи малими величинами вищих порядків, можна написати так для даного випадку

$$H = R_r - R_r \sqrt{1 - \frac{S^2}{4R_r^2}} = R_r - R_r \left(1 - \frac{S^2}{8R_r^2}\right). \quad (6.10)$$

Чи

$$H = \frac{S^2}{8R_r^2}. \quad (6.11)$$

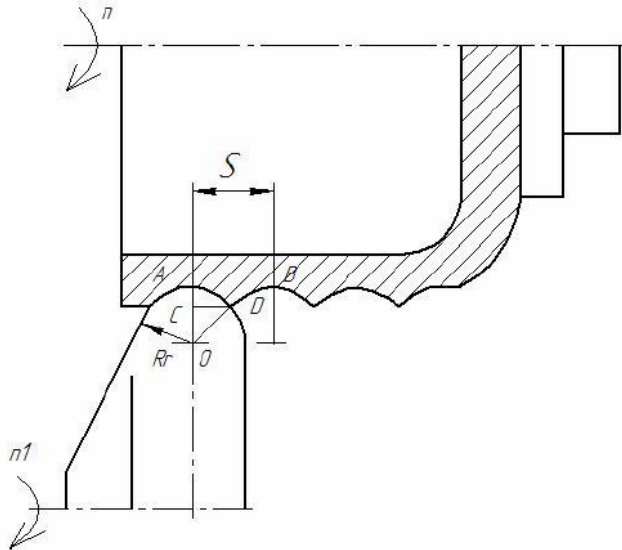


Рис. 6.4. Визначення висоти нерівностей при ротаційній витяжці циліндричної деталі

При цьому подача може бути знайдена за формулою

$$S = 2\sqrt{2R_r H - H^2}. \quad (6.12)$$

Слід мати на увазі, що при використанні великих подач і радіусів ролика $R_r \geq 3$ рекомендується не нехтувати малими величинами вищих порядків.

Досвід показує, що шорсткість H , отримана на основі наведених залежностей, не завжди добре узгоджується з практичними даними. Це пояснюється тим, що на величину H істотно впливають биття ролика і оправки, стан поверхні заготовки, вібрації і т.д. Однак для розрахунку режимів РВ ці формули дають цілком задовільні результати.

Інструмент для РВ працює у важких умовах - при високих швидкостях обертання заготовки (100-1500 м / хв) і великих тисках (до 1000-3000 МПа), тому основними робочими елементами служать ролики різної конструкції, що вільно обертаються

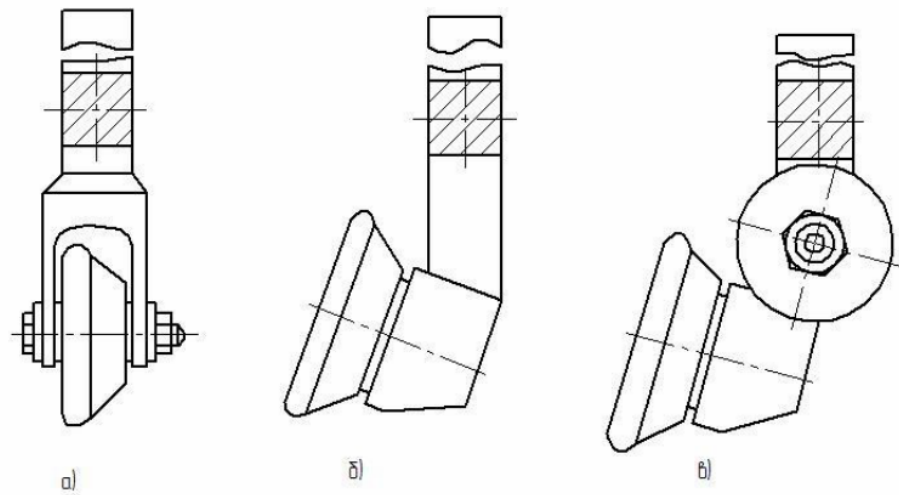


Рис. 6.5. Основні типи давильних інструментів: *a* - давильний ролик на двох опорах; *б* - консольний давильний ролик з постійним кутом нахилу; *в* - консольний давильний ролик з регульованим кутом нахилу

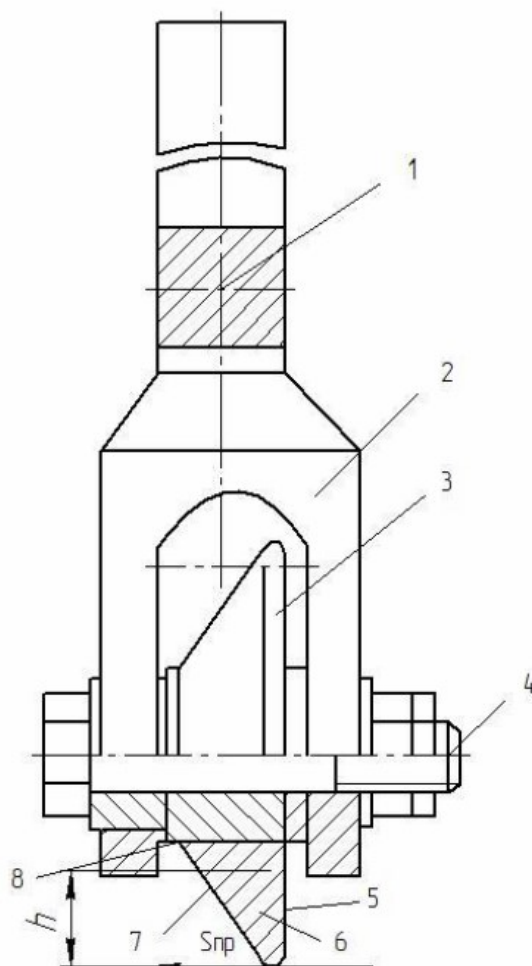


Рис. 6.6. Конструктивні елементи давильного інструменту: 1 - державка; 2 - головка, 3 - давильний ролик, 4 - вісь ролика; 5 - головна задня поверхня; 6 - вершина ролика; 7 - передня поверхня; 8 - підшипник

На рис. 6.7 показані основні геометричні параметри давильного ролика в процесі формоутворення оболонки.

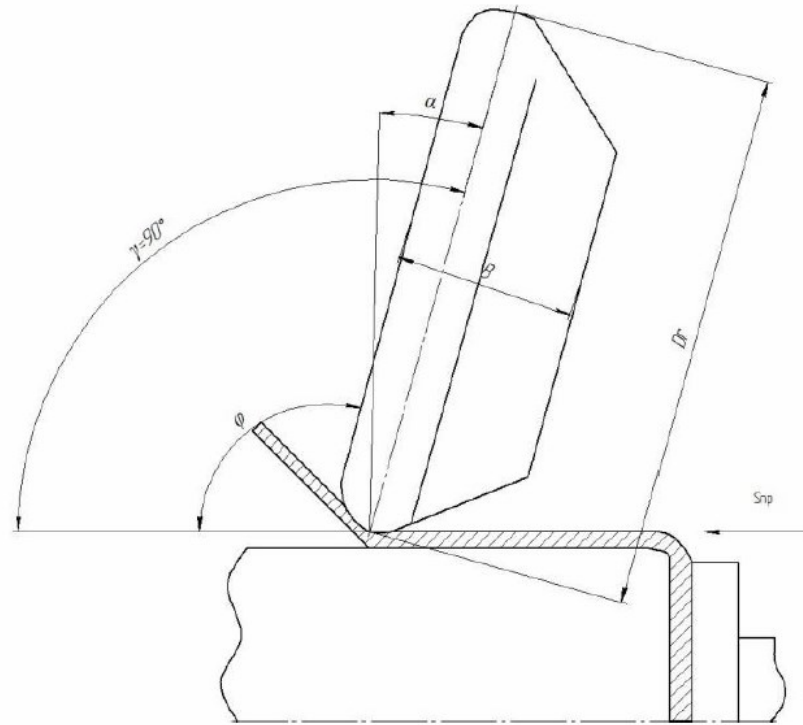


Рис. 6.7. Геометричні параметри давильні інструменту в процесі формоутворення (у русі)

Геометрію, відповідну вказаному на рис. 6.7 положенню і розмірами, наведеними на кресленні давильного ролика, назвемо геометрією в статиці.

Кути давильного інструменту в статиці можна називати кутами на тілі ролика. Для встановлення поняття про кути в статиці виберемо дві координатні площини (див. рис. 1.8) першу, або основну, і другу, допоміжну. Основною будемо називати площину, яка визначається напрямом векторів поздовжньої S_{np} і поперечної S_{nop} подач. Основну площину зручно проводити через вершину ролика. Для прийнятого робочого положення ролика основна площина горизонтальна.

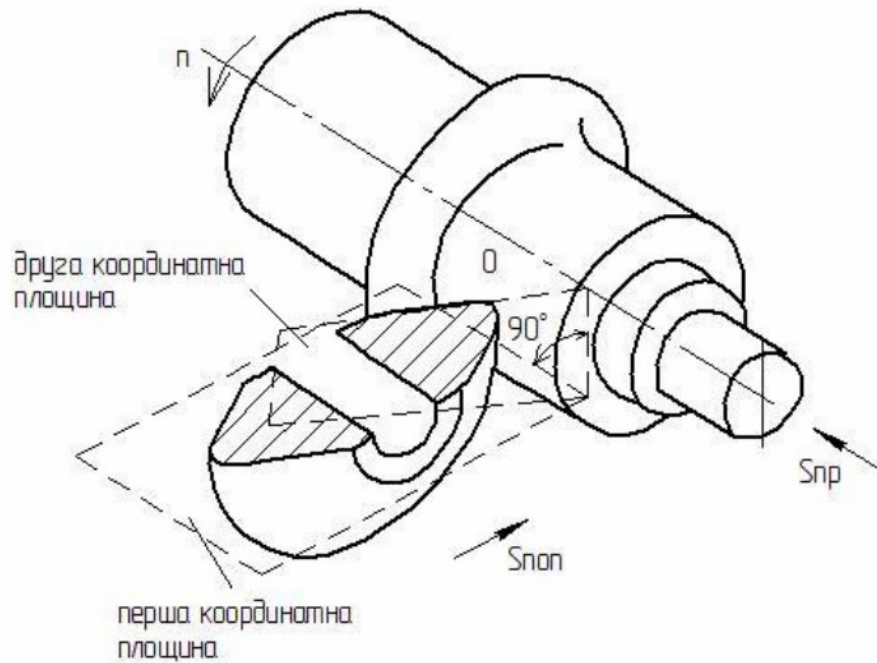


Рис. 6.8. Координатні площини при ВР на верстаті

Кути ролика в плані (кути в проекції ролика на основну площину) вимірюються між проекціями передньої і задньої поверхонь на основну площину (див. рис. 6.7, 6.8):

φ - головний кут в плані - кут між проекцією передньої поверхні на горизонтальну площину і напрямом подачі;

φ_1 - допоміжний кут в плані - кут між проекцією головної задньої поверхні ролика на основну площину і напрямом, зворотним напрямку подачі;

ψ - кут при вершині ролика.

Зазвичай задають головний і допоміжний кути в плані; тоді $\psi = 180^\circ - \varphi - \varphi_1$; h - робочий виліт ролика; B - ширина ролика; α - кут нахилу осі ролика щодо вертикальної осі оброблюваної деталі; $\alpha_v = \gamma + \alpha$ - кут установки давильні ролика на верстаті (див. рис. 6.7).

Таким чином, геометрія в статиці визначається кутами φ , φ_1 , і ψ в проекції передньої і задньої поверхні на основну площину; кутом установки інструменту α_v . З усіх кутів буде незалежним кут ψ . Кути φ і φ_1 можуть змінюватися в залежності від кута α_v . Вище розглянута геометрія передньої поверхні. Геометрія задньої поверхні розглядається подібним чином в окремих випадках, коли вона має істотне значення.

Для забезпечення автоматизованої багатоперехідної ротаційної витяжки, базовий верстат оснащений: однокоординатним гідрокопірувальним суппортом; спеціальною приставкою для управління золотником гідросуппорта і програмування руху інструменту; електричною системою, що забезпечує автоматизований цикл обробки.

Для забезпечення автоматизованої багатоперехідної ротаційної витяжки базовий верстат оснащений електрогідролічним приводом, що керується від контролера. Контролер перетворює інформацію з ПК на сигнал керування

золотником гідравлічного розподільника, який, в свою чергу, дозволяє програмувати рух інструменту по заданій траєкторії, та величину деформуючої сили.

Структурна схема установки наведена на рис. 6.9.

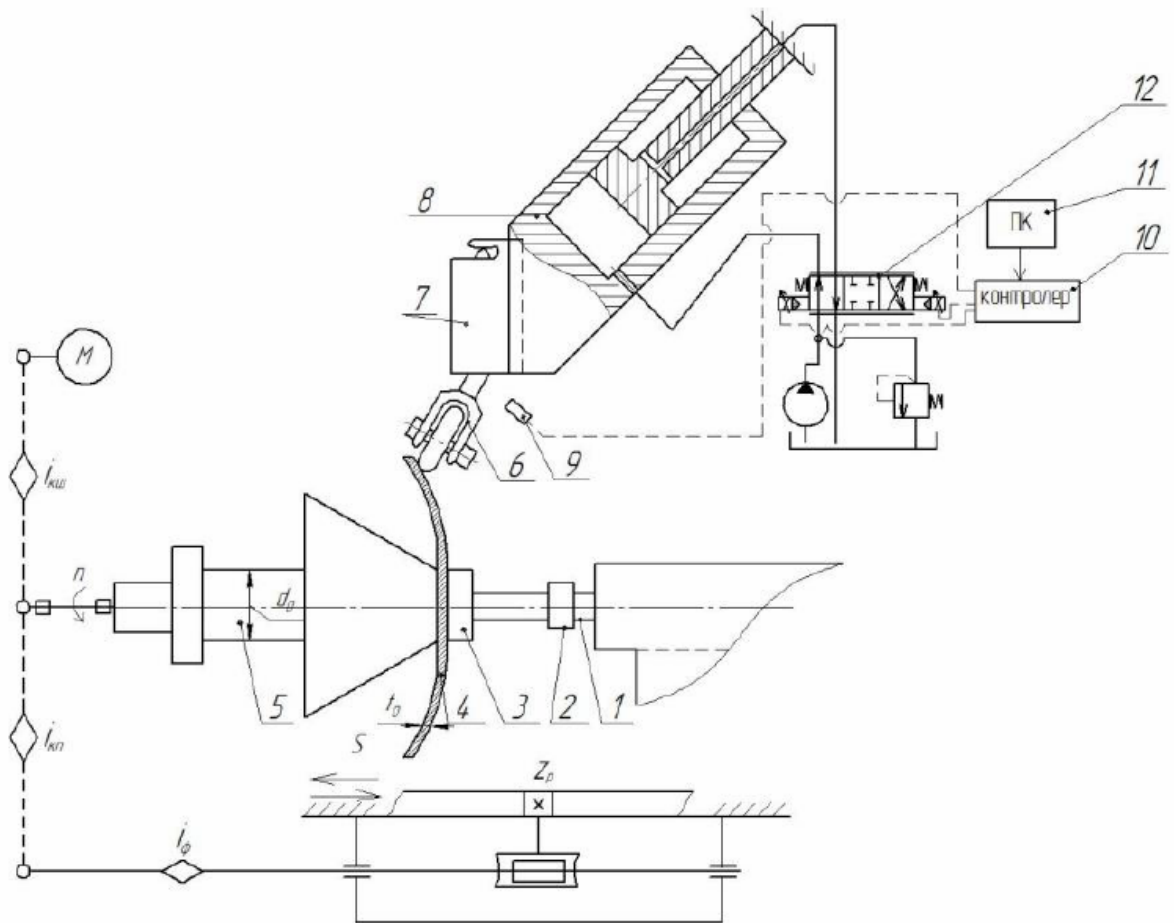


Рис. 6.9. Структурна схема установки з гідравлічним приводом, в якому використано електрогідравлічний розподільник

При ротаційній витяжці осесиметричну листову заготовку 4 з товщиною стінки t_0 встановлюють на давильну оправку 5 діаметром d_0 і притискають до неї піноль задньої бабки 1 через обертвий центр 2 і притиск 3. Обертання заготовки 4 з частотою n здійснювали від електродвигуна M через коробку швидкостей $i_{кш}$. Подача S здійснюється від шпинделя через коробку подач $i_{кп}$. Механізм фартуха з електромагнітною реверсивною муфтою $i\Phi$ і рейковою шестернею z_p передає переміщення S гідравлічному супорту 8.

Траєкторії руху інструменту 6, встановленого в динамометр 7, задаються спеціальними програмами і забезпечуються гідравлічним приводом. Переміщення робочого інструменту керується пропорційним електрогідравлічним розподільником 12, а контролювання виконується датчиком переміщення 9, який передає координати руху на контролер 10, а той в свою чергу може змінювати керуючий сигнал для розподільника 12, при необхідності. Після чого подається сигнал від контролера на магніти гідророзподільника 12.

Ротаційну витяжку оболонок виконували при русі інструменту 6 з заданим радіусом кривизни робочої поверхні, в прямому і зворотному напрямках по траєкторіям показаним на рисунку 6.10.

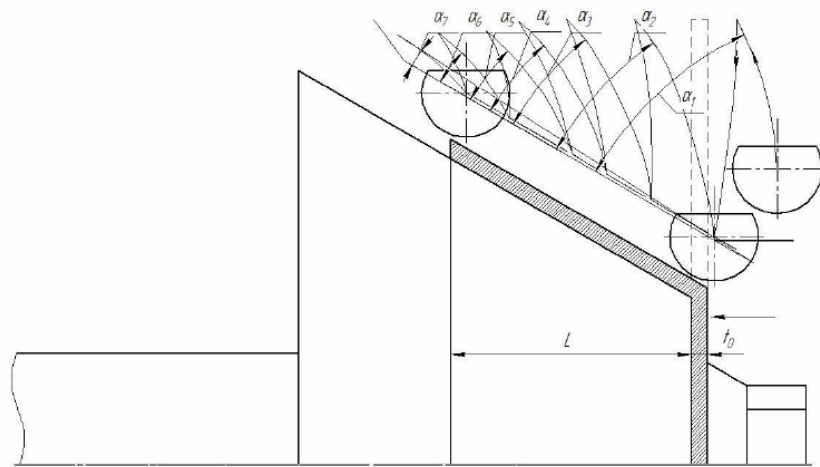


Рис. 6.10. Послідовність ротаційної витяжки заготовки та траєкторії руху інструмента

При застосуванні гідравлічного приводу збільшується точність обробки, плавність руху ролика по даній траєкторії, а також є можливість здійснювати величину деформуючої сили. При ручній обробці або за допомогою копіру точність руху ролика по заданій траєкторії значно менша, тому якість готових деталей не висока і потребує додаткової механічної обробки. Дана траєкторія на кожному проході змінює свій кут нахилу відносно поверхні заготовки від 10° до 45° (рис. 6.10). Тому для реалізації такої траєкторії та задання необхідного навантаження на ролик, доцільніше використовувати установку з електрогідравлічним приводом.

Така конструкція яка представлена на рис. 6.9, є кращою і точнішою для виготовлення даної деталі. Тому при застосуванні електрогідравлічного розподільника робота ролика контролюється за кожну долю секунди роботи за допомогою датчика переміщення 9, який забезпечує зворотній зв'язок. Дана схема має також перевагу в швидкості переобладнання на виготовлення іншої деталі.

Поряд із зазначеними перевагами ротаційна витяжка має недоліки і обмеження, які необхідно враховувати при виборі методу виготовлення порожнистих деталей. До недоліків слід віднести недостатню вивченість процесу і складність розрахунку режимів формоутворення; необхідність спеціального навчання робітників, наладчиків і технологів; підвищену складність налагодження і настроювання автоматизованих токарно-давильних верстатів в порівнянні з пресами.

На даний час перспективними є технології, в яких для проектування процесів ротаційної витяжки і задання раціональних траєкторій руху інструменту та силових режимів, використовуються сучасні досягнення прикладної теорії деформівності та теорії стійкості формозмінення листових

заготовок.

Методами ротаційної витяжки можна виготовляти порожнисті осесиметричні деталі машин, приладів, апаратів, атомних реакторів, обіддя коліс автомашин і тракторів, дифузори вентиляторів, різні посудини, ковпаки коліс, алюмінієві колби, прецизійні трубки, рефлектори, обтічники, газові балони, кришки підшипників, молочні бідони, радіолокаційні відбивачі, келихи, декоративні вази і чаші, деталі апаратів для дослідження космічного простору, супутникові тарілки, бетономішалки та інші порожнисті вироби, що мають форму, подібну показаним на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Деталі, що виготовляються ротаційною витяжкою

Отже ротаційна витяжка є ефективним технологічним процесом виготовлення з листового металу порожнистих деталей при дрібносерійному і середньосерійному виробництві.

Аналіз досліджень процесів ротаційної витяжки показує, що методами ротаційної витяжки можна отримувати осесиметричні деталі досить складних форм при невеликій витраті металу. При ротаційній витяжці є можливість регулювати процес обробки шляхом використання спеціальних програм для верстатів з ЧПК.

Запропоновано використання гідравлічного привода з електрогідравлічним розподільником дозволяє значно розширити можливості процесів ротаційної витяжки за рахунок більш точного задання траєкторій руху робочого інструмента та одночасного регулювання деформуючої сили в залежності від положення ролика на робочій траєкторії, що дозволяє позитивно впливати на історію пластичного деформування.

ЛЕКЦІЯ №7 РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ

7.1. Аналіз схем і способів технологічних процесів вальцювання заготовок

Процеси вальцювання, які набули широкого розповсюдження при виготовленні суцільних довгомірних виробів, відносяться до процесів поздовжнього локального ротаційного деформування, рис. 7.1.

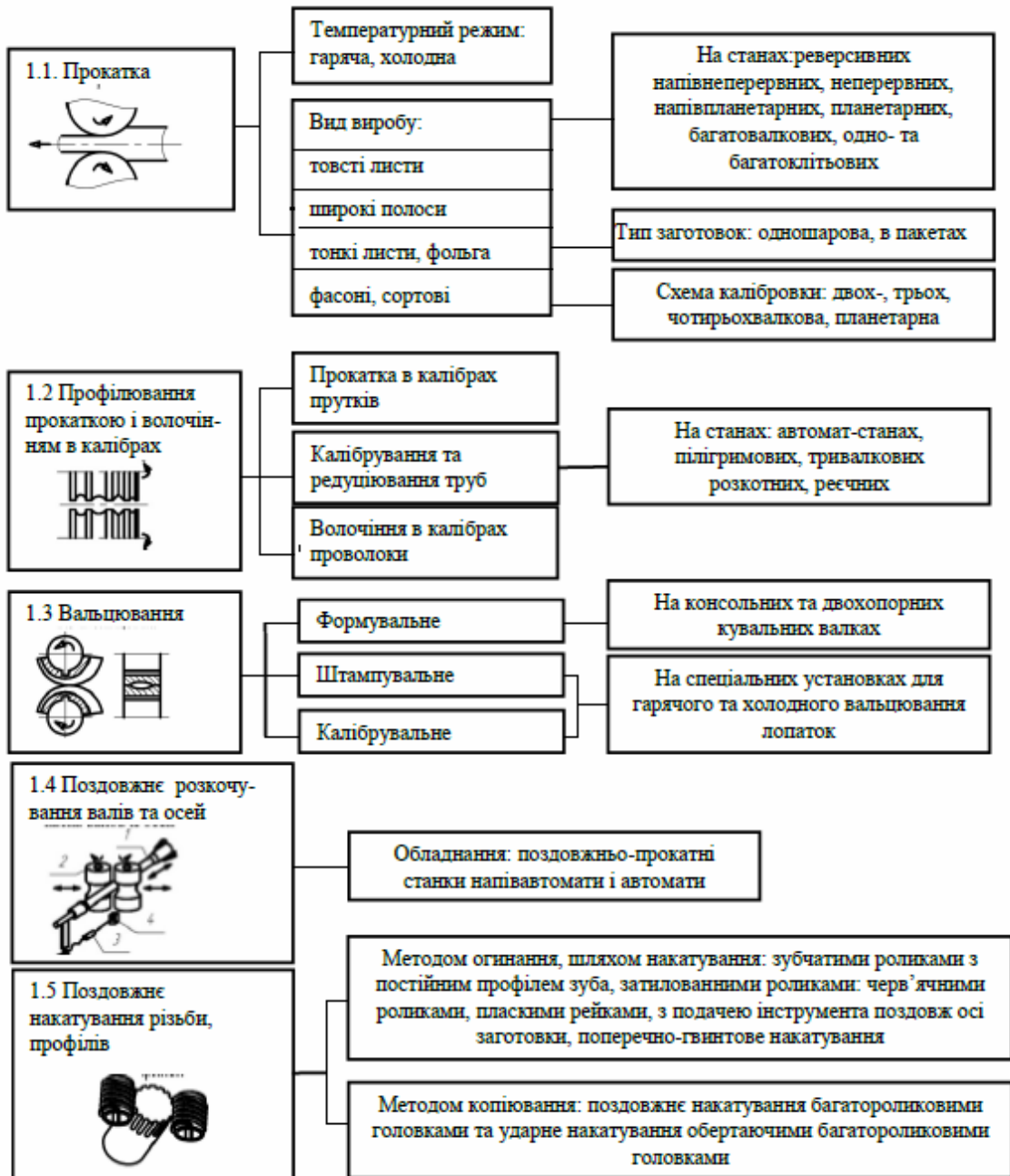


Рис. 7.1. Схеми поздовжнього локального ротаційного деформування

Таким чином, вальцювання заготовок (схема 1.3, рис. 7.1) поділяється на наступні види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під

наступне штампування на пресах або молотах; штампувальне – для отримання штампованих поковок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей замість обробки різанням (виробництво холодним вальцюванням заготовок тонкопрофільованих компресорних лопаток, загострення бурякорізальних ножів).

Процес формувального вальцювання використовується переважно як підготовча операція до об'ємного штампування для цілеспрямованого перерозподілу металу початкової заготовки. При цьому забезпечується: усунення надмірної нерівномірності деформації, неодночасного заповнення металом порожнини штампу, усунення дефектів від незаповнення струмка штампу при штампуванні великогабаритних поковок; досягнення високих ступенів деформації; виготовлення якісних штампованих виробів з високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складних видів профілів, в т.ч. заготовок з криволінійною віссю.

Одним з найпродуктивніших процесів попереднього фасонування заготовок є періодичний прокат, який здійснюється на станах поздовжньої прокатки-волочіння.

Фасонування заготовок здійснюється в калібрах. До основних параметрів, що характеризують процес фасонування заготовок вальцюванням, відносяться абсолютні та відносні зміни розміри заготовок.

Абсолютні зміни початкової висоти H_0 , ширини B_0 , та довжини до відповідних значень H_1 , B_1 та l_1 ділянки вальцьованої заготовки називаються відповідно абсолютним обтисненням ΔH , абсолютним розширенням ΔB та абсолютним подовженням Δl .

Відносні зміни розмірів заготовки характеризують коефіцієнти деформації:

- коефіцієнт обтискання $\alpha = \frac{H_0}{H_1}$;
- коефіцієнт розширення $\beta = \frac{B_1}{B_0}$;
- коефіцієнт витяжки $\lambda = \frac{l_1}{l_0}$.

Об'єм заготовки при вальцюванні залишається постійним, тому:

$$H_0 B_0 l_0 = H_1 B_1 l_1.$$

Представивши цей вираз у вигляді

$$\frac{H_1 B_1 l_1}{H_0 B_0 l_0} = \alpha \beta \lambda = 1$$

отримаємо рівність, що встановлює зв'язок між коефіцієнтами деформації:

$$\frac{1}{\alpha} = \beta\lambda.$$

Крім того, з умови постійності об'єму слідує:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{H_0 B_0}{H_1 B_1} = \frac{F_0}{F_1}. \quad (7.2)$$

де F_0 та F_1 – відповідно площа поперечного перетину заготовки до і після проходу. При вальцюванні за декілька проходів сумарний коефіцієнт витяжки $\lambda_{\Sigma} = \frac{F_0}{F_1}$ пов'язаний з коефіцієнтами витяжки на окремих проходах наступним співвідношенням:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n, \quad (7.3)$$

де $\lambda_1 = \frac{F_0}{F_1}$; $\lambda_2 = \frac{F_1}{F_2}$; ..., $\lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}$ – коефіцієнти витяжки на першому, другому і так далі проходах. Таким чином, чим більше коефіцієнт витяжки, тим більша міра обтискання заготовки.

Для вальцювання заготовки застосовують овальні, круглі, квадратні, ромбічні та інші калібри. Можлива послідовність таких калібрів показана на рис. 1.2, а їх геометричні елементи – на рис. 7.3

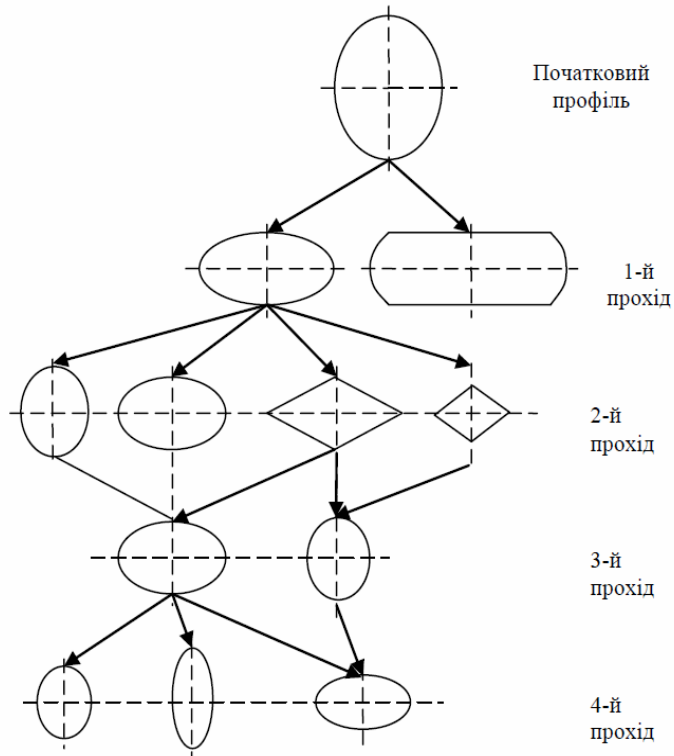


Рис. 7.2. Типові схеми послідовності фасонування заготовок в калібрах

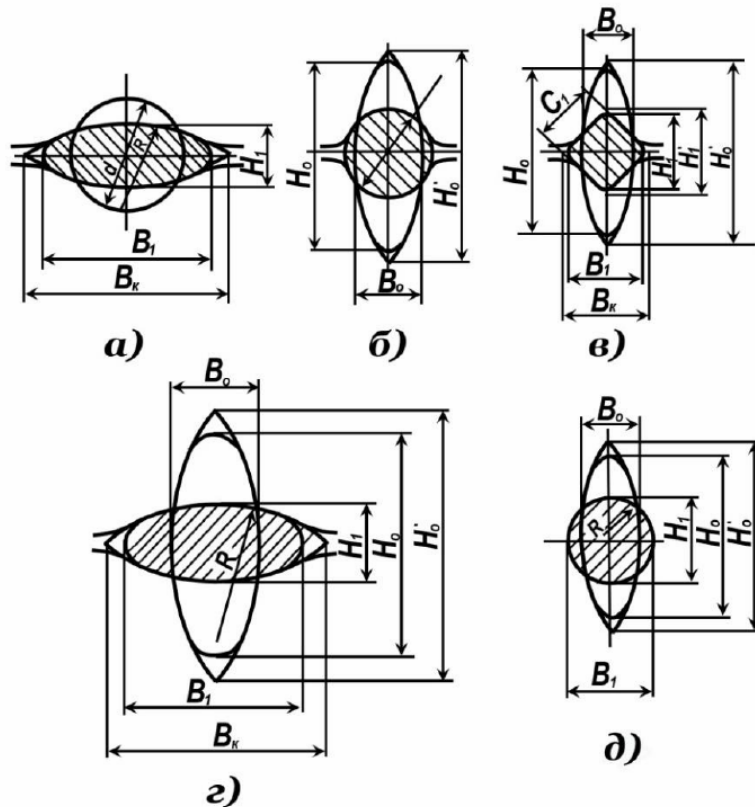


Рис. 7.3. Схеми фасонування і геометричні елементи заготовок: а) – круг-овал; б) – овал-круг; в) – овал-квадрат; г) – овал-овал; д) – овал-ребровий овал

При вальцюванні заготовок не слід перевищувати допустимого, з точки зору стійкості, відношення сторін заготовки $\alpha_0 = H_0 / B_0$ в попередньому по ходу калібрі. Рекомендуються наступні допустимі значення α_0 :

- овальної в круглому калібрі – 3,5;
- овальної в овальному калібрі – 1,6;
- овальної в ребровому овальному калібрі – 4,0;
- овальної в квадратному калібрі – 5,0.

Залежно від конфігурації заготовки і загального коефіцієнта витяжки λ_Σ вальцювання може здійснюватися за один або декілька проходів (рис.7.2). Вибір тієї або іншої схеми вальцювання і числа проходів визначається, головним чином, необхідним коефіцієнтом витяжки, а також вимогами до форми отриманої заготовки.

Криві, що відповідають максимально можливому коефіцієнту витяжки при вальцюванні заготовок за один і два проходи (рис.7.4 – рис.7.6). Використовуючи приведені на рисунках криві, можна вибрати необхідну схему і приблизно необхідне число проходів.

При проектуванні технологічного процесу вальцювання зазвичай відомий сумарний коефіцієнт витяжки λ_Σ . Відомими параметрами є також відстань між осями валків D_0 і діаметр початкового прутка d_0 .

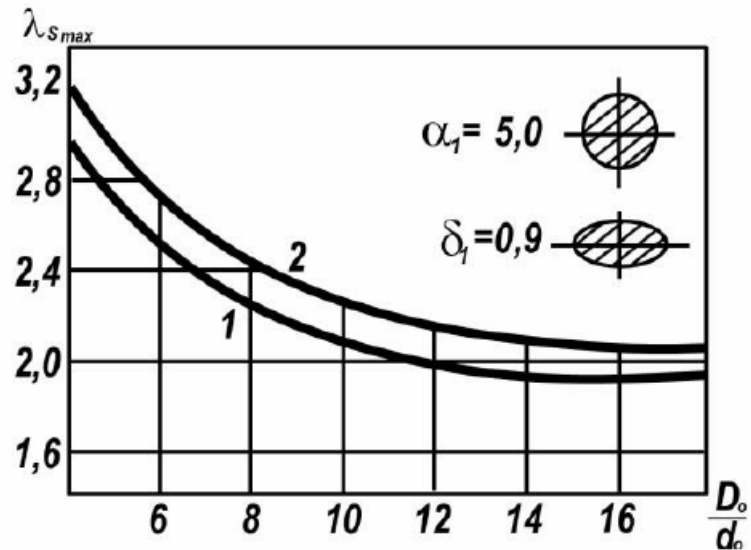


Рис. 7.4. Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал: 1 – вуглецева сталь і титанові сплави; 2 – алюмінієві сплави

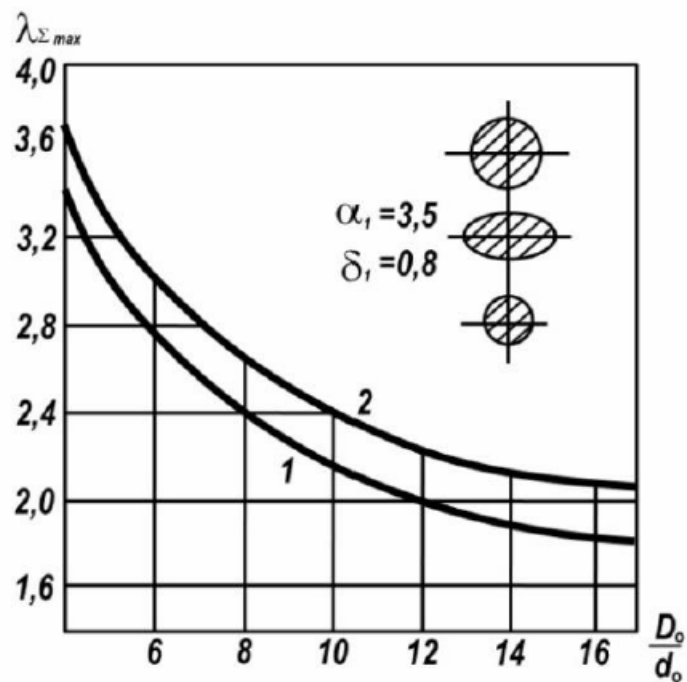


Рис. 7.5. Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал-круг: 1 – вуглецева сталь і титанові сплави; 2 – алюмінієві сплави

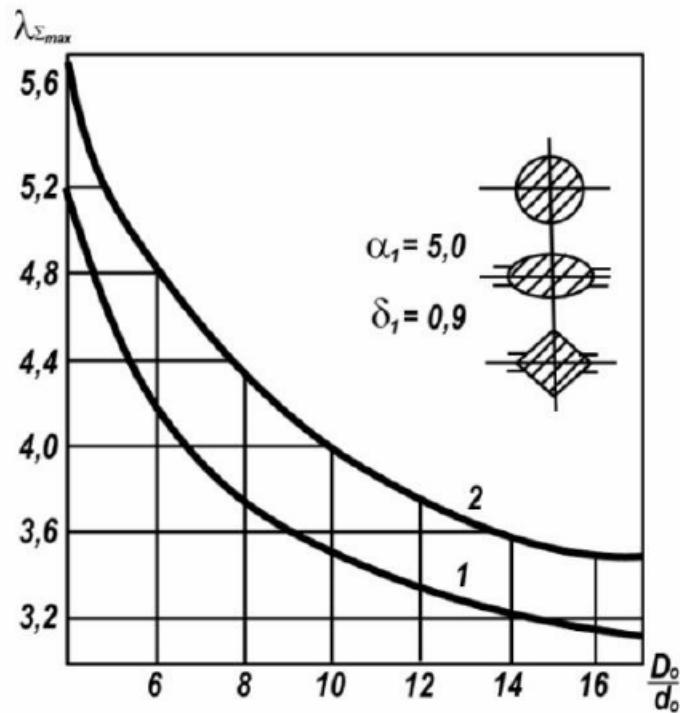


Рис. 7.6. Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал-квадрат: 1 – вуглецева сталь і титанові сплави; 2 – алюмінієві сплави

Якщо точка перетину прямих знаходиться нижче кривої, що відповідає λ_{Σ} або на ній, застосування вибраної схеми вальцювання можливе. Інакше необхідно змінити схему вальцювання або збільшити число проходів. При цьому, знаючи коефіцієнт λ_{Σ} за прийнятим набором проходів, повне його значення не складно визначити за співвідношеннями (7.3).

Слід зазначити, що в силу відмінності технологічних процесів традиційного та ізотермічного вальцювання абсолютні значення таких параметрів, як коефіцієнт витяжки, розширення, випередження, питоме зусилля будуть різні. У табл. 7.1, 7.2 приведені рекомендовані коефіцієнти витяжки при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках і калібрах різних систем, отримані на підставі багаторічного досвіду впровадження процесу вальцювання у виробництво.

Технологія вальцювання фасонних заготовок під наступне штампування включає не тільки розробку креслення вальцьованої заготовки; визначення розміру початкової заготовки; визначення загального коефіцієнта витяжки після переходів і вибір системи калібрів; розрахунок калібрів і проектування вальцювальних штампів після переходів але й вибір термомеханічних режимів деформування заготовок з конкретного сплаву.

Таблиця 7.1 – Значення максимально допустимого коефіцієнта витяжки λ при традиційному вальцюванні

№	Поперечний перетин заготовки поздовж стержня	λ	Гладкі валки або система калібрів
1.	Постійний або змінний	$\lambda = 2,0$	Гладкі валки
2.	-//-	$\lambda \leq 2,2$	Калібр плоский або однорадіусний
3.	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,3$ $2,2 < \lambda \leq 4,5$	Круг-овал-ромб
4.	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,5$ $2,2 < \lambda \leq 4,7$	Круг-овал-квадрат
5.	Постійний Змінний	$3,7 < \lambda \leq 4,5$ $3,7 < \lambda \leq 6,2$	Круг-овал-ромб-квадрат
6.	Постійний Змінний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$ $2,5 < \lambda \leq 3,9$	Круг-овал-круг
7.	Постійний Змінний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$ $2,5 < \lambda \leq 3,9$	Круг-овал-ромб-круг

Таблиця 7.2 – Значення максимально допустимого коефіцієнта витяжки λ при ізотермічному вальцюванні

№	Поперечний перетин заготовки поздовж стержня	λ	Гладкі валки або система калібрів	Примітка
1.	Постійний або змінний	$\lambda = 2,0$	Круг-овал-ромб	Овал плоский або однорадіусний
2.	Постійний Змінний	$\lambda \leq 2,2$	Круг-овал-ромб	-
3.	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,3$ $2,2 < \lambda \leq 4,5$	Круг-овал-квадрат	-
4.	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,5$ $2,2 < \lambda \leq 4,7$	Круг-овал-ромб-квадрат	-
5.	Постійний Змінний	$3,7 < \lambda \leq 4,5$ $3,7 < \lambda \leq 6,2$	Круг-овал-круг	-
6.	Постійний Змінний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$ $2,5 < \lambda \leq 3,9$	Круг-овал-ромб-круг	-

Для забезпечення цих вимог приведені технічні умови і термомеханічні режими деформування алюмінієвих сплавів (таблиця 7.3).

Таблиця 7.3 – Термомеханічні режими кування і штампування алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Температурний інтервал деформування,	Допустима степінь деформації, %		Устаткування	
		Лита заготовка	Пресована заготовка		
АМц, АМг1, АМг2, АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АД0, АД1, 01205	470-300 470-300	70 70	90 90	Прес гідравлічний	
Д1, Д1ч, ВД17, 1230, АК8	470-370 450-350	60 –	70 60		
Д20, Д21, 1201, АК4, АК4-1, АК4-1ч	470-350 430-320	60 –	70 60		Молот або прес механічний
АМг3, АМг4, АМг5, АМг5П, АМг6, В92, М40, В92Ц, 1915, 1913	430-320 430-300	60 –	60 50		
В95, В95пч, В96Ц, В96Цпч, В96Ц3	430-350 430-320	60 –	60 50		
Д19ч, ВАД1 (1191) Д16ч	470-350 430-350	60 –	60 50		

Вказані рекомендації для деформування заготовок у напрямі, перпендикулярному осі (по твірній). Значення допустимої деформації, приведені в таблиці 7.3, мають бути знижені для алюмінієвих сплавів на 15 – 25%, щоб уникнути отримання крупнозернистої структури, внаслідок процесів рекристалізації при куванні та штампуванні. Відзначається, що сплави низької міцності (менше 300 МПа), а також сплав АК6, що відноситься до середньої міцності, мають високу пластичність, яка практично не залежить від швидкості деформації. Сплави середньої ($\sigma_m = 300 - 450$ МПа) і високої міцності ($\sigma_m > 450$ кг/мм²) при гарячому деформуванні достатньо пластичні, але із збільшенням швидкості деформування від статичної (до 0,3 м/с) до динамічної (до 8,0 м/с) пластичність цих сплавів знижується на 15 – 20%, що необхідно враховувати при обробці їх на механічних пресах і молотах.

Розглянемо роль і місце вальцювання на прикладі технологічних процесів виготовлення лопаток компресора газотурбінних двигунів [7]. Різноманіття технологічних процесів виготовлення лопаток розрізняються способами отримання заготовок і видами остаточних формотворчих операцій. Розрізняють сім основних методів, що застосовуються на етапі отримання

заготовок: 1) лиття; 2) сортовий прокат; 3) поковка на молотах; 4) поковка на ГKM або пресах; 5) поковка в кувальних вальцях; 6) періодичний прокат поздовжній; 7) періодичний прокат поперечний.

Серед остаточних формотворчих та фінішних операцій виділяють п'ять способів: 1) шліфування розмірне; 2) шліфування безрозмірне; 3) холодне вальцювання; 4) обробка кульками; 5) електрохімічна обробка.

В результаті техніко-економічного аналізу технологічних процесів для лопаток з довжиною пера до 250 мм в умовах масового виробництва виявлено, що в більшості випадків найефективнішими є варіанти технологічних процесів, засновані на використанні холодного вальцювання лопаток як остаточної формотворчої операції пера. У цьому випадку виключається фрезерування і шліфування пера, підвищується продуктивність праці, забезпечується стабільність розмірів і форми, зменшується хвилястість пера, збільшується коефіцієнт використання металу і майже повністю виключається ручна доробка пера.

В результаті узагальнення досвіду роботи підприємств авіаційної промисловості, головними інститутами галузі рекомендовані декілька схем типових і перспективних технологічних процесів, які забезпечують кращі техніко-економічні показники при обробці лопаток, подібних за своїми конструктивно-технологічними характеристиками. Основними відмінними ознаками процесів за встановленими схемами є: величина гарантованого припуску, габаритні розміри, матеріал, методи попереднього та остаточного фасонування і механічної обробки.

Залежно від марки матеріалів, габаритних розмірів і конструктивних особливостей лопаток можливе холодне вальцювання за один або кілька переходів з проміжною термообробкою.

. Зокрема схема, що представлена на рис. 7.7 охоплює виготовлення одно- і двозамкових лопаток довжиною до 250 мм з припуском по перу 0,8 ... 1,2 мм на сторону під електрохімічну обробку із корозійностійких сталей і титанових сплавів на гвинтових пресах із застосуванням інших видів обладнання на попередніх операціях.

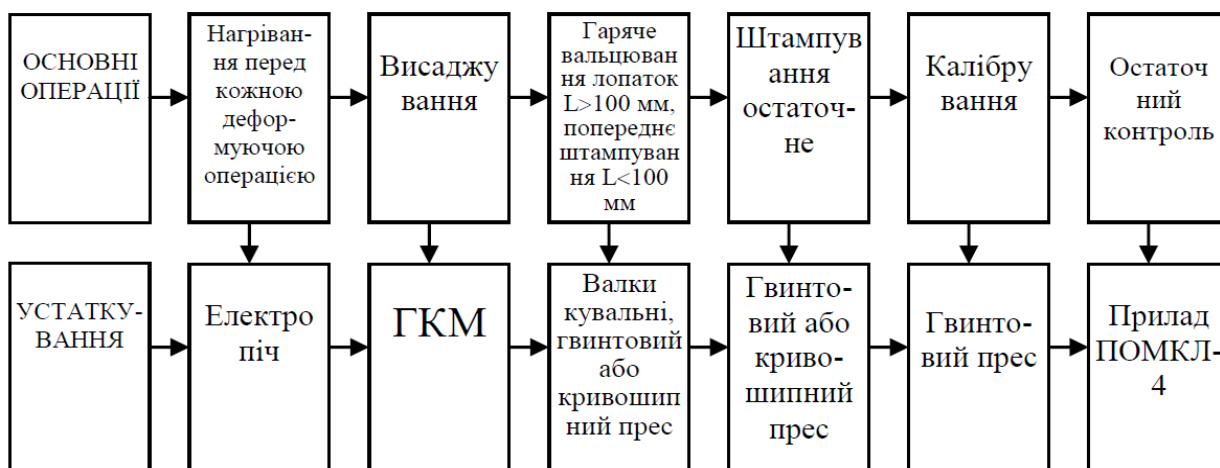


Рис. 7.7. Схема технологічного процесу виготовлення одно- і двозамкових лопаток довжиною до 250 мм з припуском по перу 0,8-1,2 мм на сторону.

Згідно результатів науково-дослідних робіт, з урахуванням перспектив розвитку технологій, головними інститутами авіаційної промисловості були розроблені комплексні перспективні технологічні процеси виготовлення лопаток довжиною до 250 мм. Схема з використанням процесів деформування в ізотермічних умовах для отримання точних заготовок одно- і двозамкових лопаток з припуском по перу на шліфування з подальшим поліруванням профілю представлена на рис. 7.8.

Таким чином, гаряче вальцювання є однією із перспективних операцій формоутворення точних та надійних виробів, в т.ч. лопаток компресорів газотурбінних двигунів.

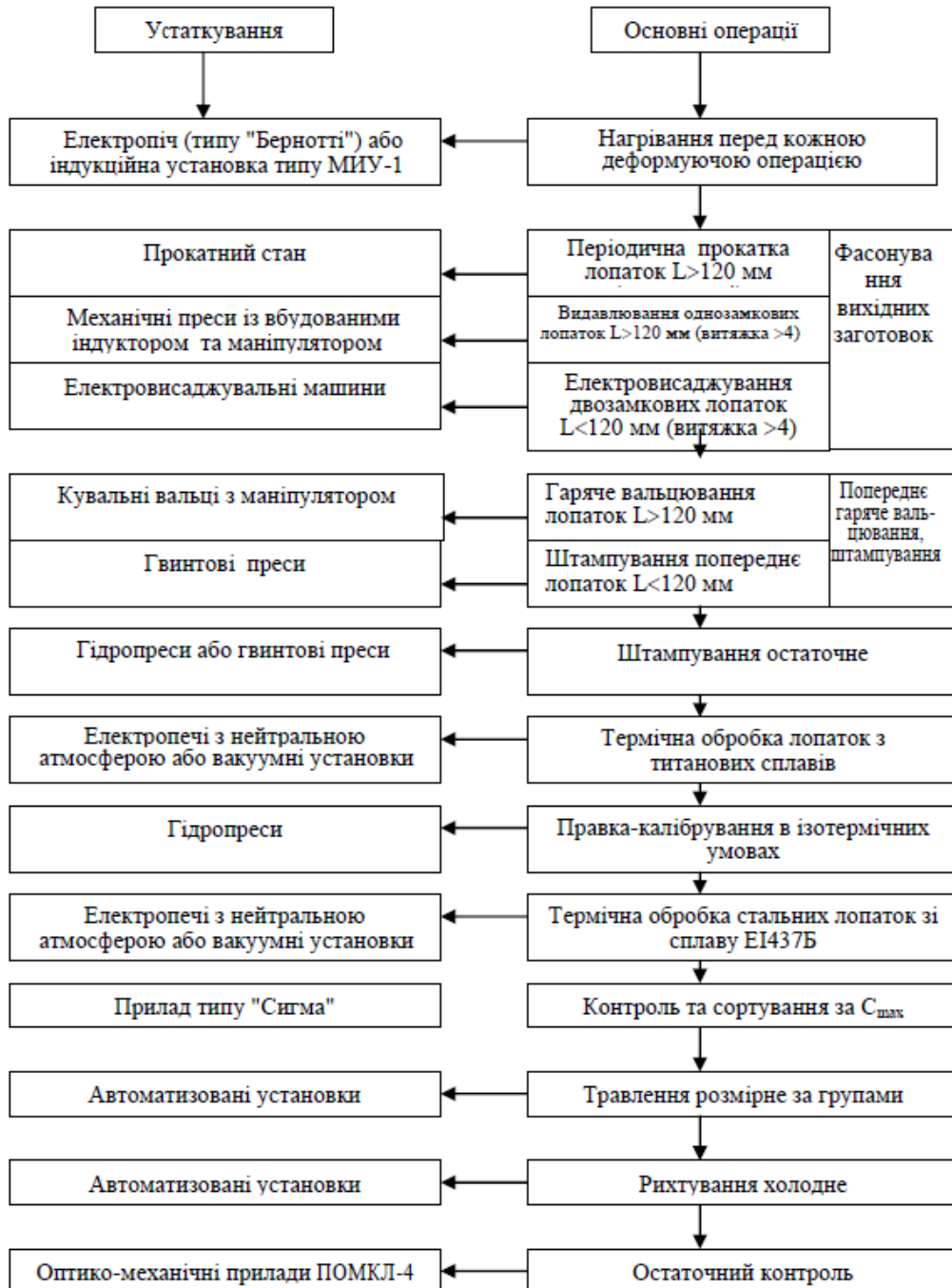


Рис. 7.8. Схема перспективного технологічного процесу виготовлення однозамкових лопаток довжиною до 250 мм без припуску по перу на лезову обробку

Основна необхідність застосування гарячого вальцювання, у порівнянні з холодним, це потреба зниження характеристик міцності і підвищення характеристик пластичності оброблюваних металів. При цьому істотний вплив на пластичність, характеристики міцності і структуру готових поковок і штамповок чинять режими деформування – температура, швидкість і ступінь деформації. В технологічних процесах обробки металів тиском термомеханічні режими деформації повинні забезпечувати достатню пластичність, однорідну структуру і високі механічні властивості.

7.2. Розрахунок швидкостей обертання інструменту та заготовок

Процес вальцювання в своїй основі є процесом поздовжньої прокатки, теоретичні аспекти якого до теперішнього часу достатньою мірою розроблені. Проте процес вальцювання не є стаціонарним, що не дозволяє для його математичного моделювання застосувати відомі аналітичні залежності, характерні для прокатки.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що до теперішнього часу є часткові рішення задачі визначення НДС і кінематики течії матеріалу заготовки, отримані зі значними спрощуючими припущеннями. Такий підхід дозволяє достатньо точно визначати силові параметри процесу вальцювання. Проте він неприйнятний для визначення небезпечних, з точки зору руйнування, зон заготовок і оцінки деформованості металів при вальцюванні.

Важливим при оцінці напруженого стану і особливо оцінці деформованості матеріалів є визначення показників напруженого стану. При цьому найбільшого поширення набуло представлення залежності пластичності від показника напруженого стану, запропонованого Г. О. Смірновим-Аляєвим:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}, \quad (7.4)$$

де $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напруження; $I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень. Показник не враховує вплив третього інваріанта тензора напружень, тому діаграму пластичності в координатах « $\epsilon_u - \dot{\eta}$ » не можна вважати за єдину для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформованості металів в різних технологічних процесах необхідно мати в своєму розпорядженні «єдину» діаграму пластичності, що описує пластичність при різних схемах напруженого стану. Випробування металів на пластичність в камері високого тиску різними методами показали різні результати, відповідні одним і тим же значенням показника напруженого стану $\dot{\eta}$. Зокрема В. Л. Колмогоровим встановлено, що при розтягуванні в умовах $\dot{\eta} = 0$ пластичність вища, ніж при крученні. О. О. Богатов і ін. показали, що результат випробувань виходить різний, при

цьому яка характеристика більша, залежить від марки металу. В. А. Огородніков встановив, що при крученні, у разі створення в камері високого тиску умов з рівними значеннями показника напруженого стану, пластичність буде нижча, ніж при стискуванні.

Для виключення можливих розбіжностей при оцінці деформованості металів необхідно, щоб в досліджуваному технологічному процесі та експериментах по побудові діаграм пластичності дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї-Лоде, що характеризує вид девіатора:

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (7.5)$$

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах « $\varepsilon_u - \dot{\eta} - \mu_{\sigma}$ ». Вказана залежність запропонована С. І. Губкіним, однак її побудова пов'язана з цілим рядом труднощів експериментального характеру.

Вибір і обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань механіки матеріалів розглянуто в роботі О. О. Лебєдєва, В. М. Михалевича.

В. А. Огородніков встановив, що в умовах спільного кручення та розтягу на фоні високого гідростатичного тиску ($\dot{\eta} = \text{const}$) діаграма пластичності не є єдиною.

У роботі В. А. Огородніковим запропоновано від діаграми пластичності в координатах $e_p - \dot{\eta}$ перейти до діаграми в координатах $e_p(\dot{\eta}, \chi)$ шляхом введення поправки на плоскі діаграми без проведення дослідів в камері високого тиску, де χ – показник, що враховує третій інваріант тензора напружень:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_{\sigma})}}{\sqrt{3I_2(D_{\sigma})}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (7.6)$$

Поверхню пластичності, побудовану в координатах « $\varepsilon_u - \dot{\eta} - \mu_{\sigma}$ », можна визначити як об'ємну діаграму пластичності. Перетин поверхні площиною, перпендикулярною осі $\chi = 0$, приводить до отримання діаграми пластичності в координатах $\varepsilon^* = \varepsilon^*(\dot{\eta})$. Для побудови діаграм пластичності по даній методиці необхідно проводити трудомісткі випробування в камері високого тиску. Це унеможливорює випробування пластичних матеріалів на стискуванні, а випробування зразків на розтяг приводять до спотворення результатів внаслідок появи шийки.

І. О. Сиваком розроблена методика побудови поверхонь $\varepsilon^*(\dot{\eta}, \mu_{\sigma})$ шляхом простих випробувань на розтяг, стиск, чистий зсув і випробувань на осаджування циліндричних зразків в пластичних оболонках різної товщини.

Аналіз наявних методик випробування металів на пластичність і

побудови діаграм пластичності, проведений В. А. Матвійчуком, дозволив виявити їх недоліки, обумовлені несталістю показника жорсткості напруженого стану. За результатами досліджень отримано рівняння для визначення приросту пластичності в залежності від відношення радіусу кривизни шийки до її діаметру, яке дозволяє враховувати ефект «аномального» підвищення пластичності у випадку утворення шийки при розтягуванні. Запропоновано також способи випробування металів на пластичність, такі як осаджування кільцевих заготовок інструментом з конічною поверхнею та кручення трубчастих зразків на оправці з кульковим сепаратором, які забезпечують сталість показників напруженого стану і рівномірність розподілу НДС в деформованих зразках.

За результатами досліджень побудовані епюри зміни показника напруженого стану на поверхні заготовок (рис. 7.9). Значення параметрів прокатки зрозуміло з позначень розмірів в калібрах (рис. 7.10).

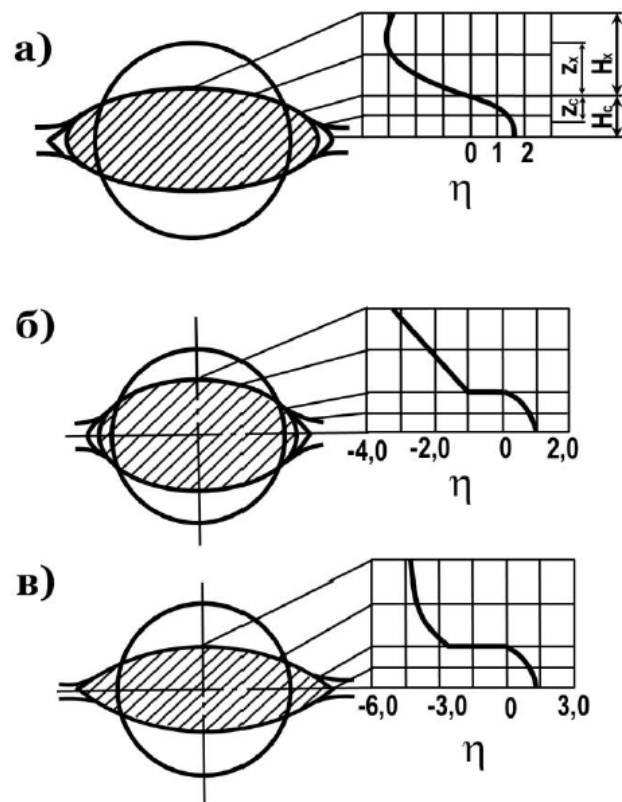


Рис. 7.9. Розподіл показника напруженого стану η на поверхні заготовки при прокатці за схемою круг-овал: а) $A = 19; a_k = 4,5; 1\alpha = 2,38$ б) $14,8; 2,5; 1 1,67$ $kA = a = \alpha =$ в) $32; 6,28; 1 3,6$

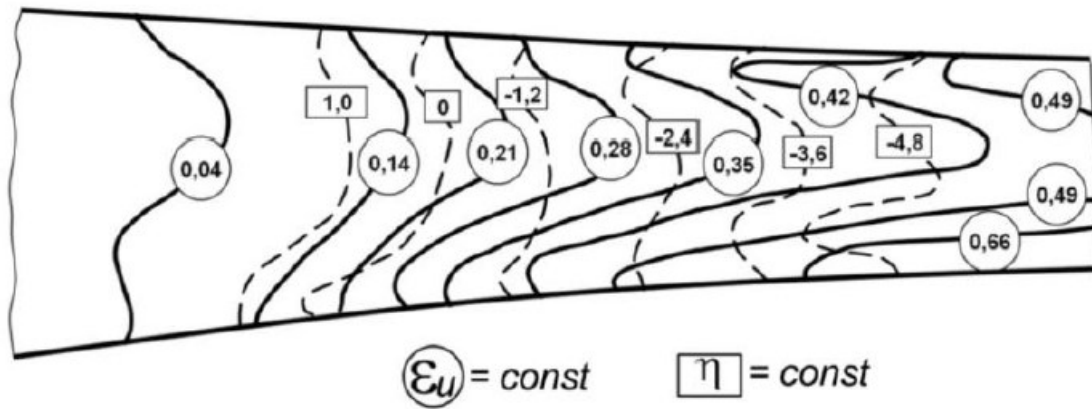


Рис. 7.10. Характер розподілу величин ε_u і η в поздовжньому серединному перетині осередку деформування заготовки при вальцюванні

Приведені на рис. 1.9 епюри ілюструють закономірності зміни показника по контуру перетину заготовки. На вільній поверхні (по роз'єму калібру) спостерігається найбільш жорстка схема напруженого стану, відповідна розтягуванню. В області контакту валків із заготовкою переважають напруження стиску.

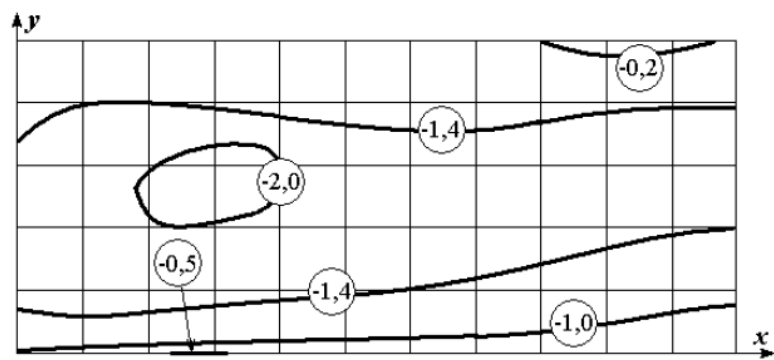
При дослідженні НДС пера лопаток при холодному вальцюванні в роботах Матвійчука В.А. була застосована методика, що заснована на методах ліній плину, функцій напружень і теорії *R-функцій*.

На рис. 7.10 показаний характер розподілу інтенсивності деформацій і показника напруженого стану в поздовжньому перерізі пластичної зони заготовки при вальцюванні.

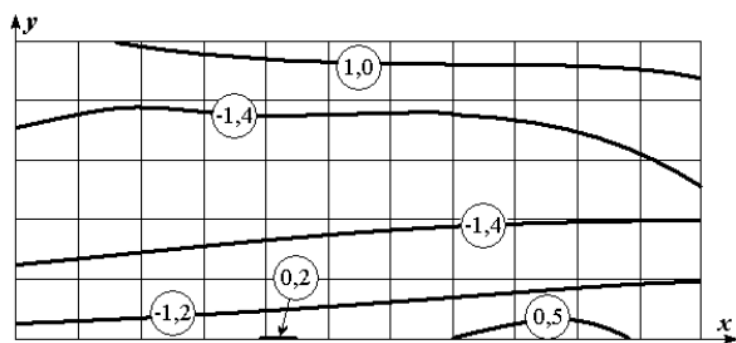
Показник напруженого стану η в зоні вальцювання змінюється від величин $\eta = 1$, відповідних розтягуванню, на вході в контакт з валками, до величин під валками ($\eta = -3 \dots -5$), відповідних стиску (рис. 7.11).

Для вдосконалення процесу вальцювання важливо також знати величину середнього за прохід показника в зоні деформування, під якою розуміють таку величину, для якої ресурс пластичності, обчислений за критерієм Г. О. Смірнова-Аляєва (без урахування історії деформування), збігатиметься з ресурсом, визначеним за критерієм В. А. Огороднікова, що враховує вплив історії деформування. Очевидно, що η_c залежить також від діаграми пластичності і він становив що $\eta_c = -1,2 \dots -1,5$, причому більші по абсолютній величині значення відповідають діаграмам із слабкою залежністю пластичності від показника η .

Таким чином, при зміні форми припуску при калібрувальному вальцюванні або зміни форм калібрів при формувальному вальцюванні, показник напруженого стану матеріалу найбільш небезпечної зони заготовки змінюватиметься. При цьому показник напруженого стану змінюється від $\eta \approx 1$ на вході заготовки в контакт з валками, до $\eta \approx -4 \dots -5$ під валками.



a)



б)

Рис. 7.11. Розподіл показника по перу лопатки при вальцюванні з еквідистантним (а) і пропорційним обтискуванню (б) припуском

ЛЕКЦІЯ №8

РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

8.1. Сучасні методи ППД. Залежність механічних властивостей пластично деформованого поверхневого шару від параметрів процесу

Однією із важливих задач при виготовленні деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке дозволяє повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів в реальних деталях складної будови та в деталях з концентраторами напружень.

Поверхнєве пластичне деформування – розповсюджений і ефективний спосіб підвищення несучої здатності металевих деталей машин. Найвагомий ефект зміцнення від застосування ППД досягається для циклічно навантажених деталей з конструктивними або експлуатаційними концентраторами напружень. ППД ефективно також і по відношенню до деталей, що піддаються при експлуатації зношуванню.

Поверхнєве деформування поверхневих шарів здійснюють різноманітними способами, які можна поділити на дві групи. До першої відносять такі, що передбачають створення зусилля деформування від інструмента шляхом безперервного контакту з деталлю (статичні), до другої – ті, при яких здійснюється ударна дія по деталі робочих тіл або інструмента (динамічні). Не дивлячись на різноманіття способів ППД, їх поєднує спільність основних процесів та впливів на стан металу та оброблюваної поверхні. При різних умовах оброблювання проявляються або неперервні, або дискретні особливості матеріалів.

В результаті зміцнення поверхневих шарів при поверхневому деформуванні можна забезпечити покращення фізико-механічних властивостей металу внаслідок структурних перетворень, подрібнення зерен, а також формування в поверхневому шарі залишкових напружень стиску, що виникають за рахунок розвитку зсувів кристалічної ґратки. Експлуатаційні властивості деталей визначаються цими спільними факторами. Крім того відбувається покращення якості поверхні, що проявляється в зменшенні висоти нерівностей, більш похилої їх конфігурації, що важливо, наприклад, для поверхонь пар тертя.

В залежності від форми, розмірів, матеріалу деталі, вимог, що висуваються до геометричних параметрів та якості поверхні, виробничих та інших умов можуть застосовуватися різноманітні способи зміцнювального оброблювання ППД. Вони відрізняються за схемами силової дії на оброблювану деталь, продуктивністю, економічністю та іншими показниками (рис. 8.1). Як спільні класифікаційні ознаки можна використовувати швидкість деформування; схему контактування

деформуючих тіл з поверхнею деталі; форму робочої ділянки деформуючого тіла; зв'язок деформуючих тіл з джерелом руху способі передачі енергії до інструмента.



Рис. 8.1 - Класифікація способів зміцнювального оброблювання ППД

Деформація поверхні залежить від сили обкочування, профільного радіуса інструмента, подачі, співвідношення діаметрів деталі і інструмента.

В результаті застосування ППД в поверхневому шарі заготовки змінюються характеристики міцності і пластичності матеріалу, зростає

твердість і залишкові стискаючі напруження, змінюється структура і текстура матеріалу. Однак цілеспрямовано впливати на ці зміни і прогнозувати необхідні якісні характеристики поверхневого шару не завжди є можливим через складність і не стаціонарність процесів ППД, а також недостатню їх вивченість.

В силу зазначеної складності впливу різних параметрів на зміцнення поверхневого шару, впровадження процесів ППД для отримання необхідних характеристик виробу супроводжується трудомісткими експериментами. Причому їх результати поширюються, головним чином, тільки на встановлення певних характеристик конкретних виробів з конкретного матеріалу.

Найбільш узагальнюючими, для формування службових властивостей виробів, є характеристики міцності і пластичності матеріалу, а також рівень залишкових стискаючих напружень в поверхневому шарі виробу, обробленого ППД. Особливо важливою є інформація про величину і характер розподілу в поверхневому шарі накопиченої деформації та залишкового ресурсу пластичності. Зазначені характеристики визначають здатність матеріалу піддаватися подальшій пластичній деформації.

Поряд зі зміцненням, в поверхневому шарі відбувається розміцнення металу, викликане ефектом Баушінгера через зміну знака деформації. Особливо інтенсивне розміцнення спостерігається при перенаклепі і великому накопиченні пошкоджень, що призводить до подальшого зниження твердості і міцності оброблюваного металу. Отже, головними факторами зменшення твердості є:

а) прояв ефекту Баушінгера, що полягає в знакозмінних деформаціях - посилюється зі зростанням пластичної хвилі, а значить, з ростом глибини впровадження;

б) наявність контактної тертя і підвищення температури в зоні контакту;

в) перенаклеп металу і вичерпання ресурсу пластичності.

В результаті, при тривалому пластичному зміцненні вимірювання твердості не дає уявлення про ступінь деформації зміцненого шару. В цьому випадку твердість характеризує властивості міцності металу і побічно пов'язана з залишковими напруженнями. Якщо необхідно визначити ступінь деформації, накопичений за певне число проходів або час деформування, то за допомогою вимірювання твердості її слід визначати при обмеженому числі проходів або часу обробки (тим меншому, чим менший коефіцієнт зміцнення металу). Накопичену ж за весь процес обробки ступінь деформації можна визначити як сумарну по проходах або часу обробки (з урахуванням поетапного зменшення внаслідок зміцнення металу, якщо деформування ведеться при постійному навантаженні або енергії удару).

Інтенсивне пластичне розпушення матеріалу, яке спостерігається на певному етапі ППД і супроводжується падінням твердості (мікротвердості) (рис. 8.2), що свідчить про подальший негативний вплив процесу ППД на службові характеристики поверхневого шару (рис. 8.2, крива 2).

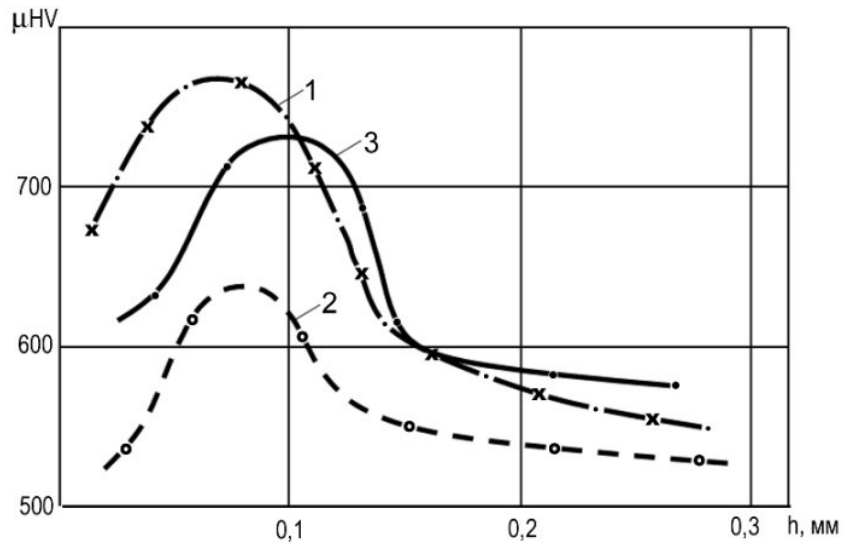


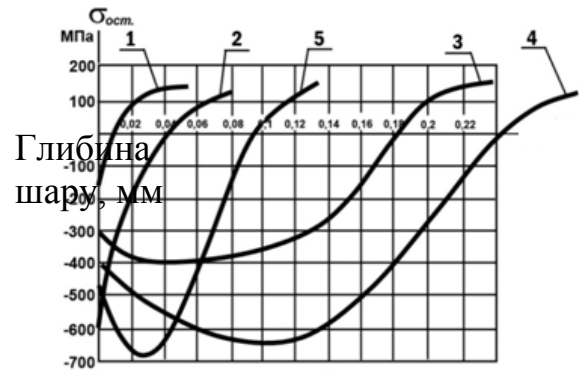
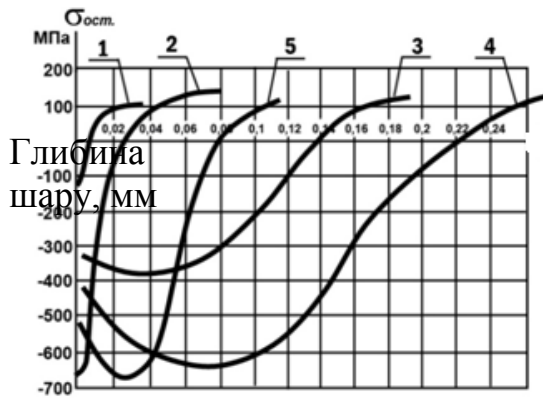
Рисунок 8.2 - Характер розподілу мікротвердості μHV по глибині поверхневого шару при обкочуванні прутка ЭП718 шариками: 1 - 2 прохода с обжимом $\Delta h = 0,04\text{мм}$; 2 - 15 проходів, $\Delta h = 0,04\text{мм}$; 3 - 1 прохід, $\Delta h = 0,07\text{мм}$.

Відповідно до даних рис. 8.2 і тарувального графіку сплаву ЭП718, максимальне значення інтенсивності деформацій, для кривих 1 і 3, спостерігалось на глибині 0,1 мм і становить. Визначити ж накопичену деформацію за результатами кривої 2 вже не представляється можливим.

Таким чином, вимір твердості можна використовувати для визначення ПДВ матеріалу поверхневого шару заготовки на початкових стадіях процесу ППД і для визначення факторів, що зміщують область максимальних деформацій до поверхні заготовки, а також в якості критерію, який би процес обробки по моменту падіння твердості зміцненого шару.

Дослідження поверхневого шару показують, що всі способи поверхневої пластичної деформації створюють на поверхні остаточні напруження стиску, різні за величиною і глибиною розповсюдження, з переходом на глибині в розтягуючі остаточні напруження (рис. 8.3).

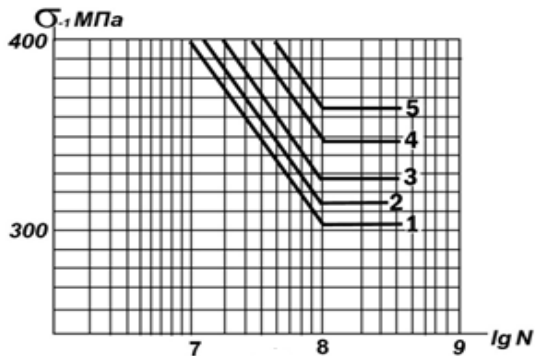
Результати втомних випробувань деталей після зміцнення методами ППД, як правило, показують на підвищення межі витривалості (рис. 8.4), але однозначного зв'язку з величиною і глибиною поширення залишкових напружень стиску не дають.



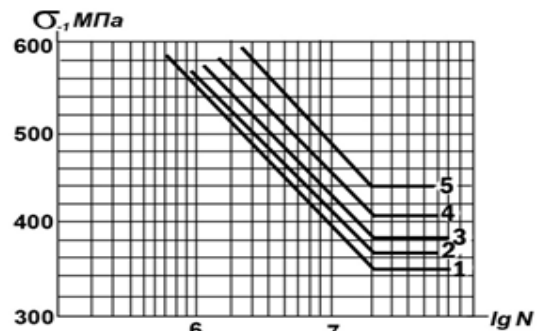
а)

б)

Рисунок 8.3 – Розподіл остаточних напружень в поверхневому шарі лопаток зі сплавів ВТ8 (а) і ЭП718 (б) при різних видах фінішної обробки: 1 – нормалізуюча термообробка; 2 – віброгалтовка сталевими кульками діаметром 1,0-1,3 мм; 3 – ультразвукове зміцнення сталевими кульками діаметром 1,0-1,3 мм; 4 – гідродробоструменеве зміцнення кульками діаметром 1,6 мм; 5 – дробоструменеве зміцнення сталевими кульками діаметром 0,1-0,2 мм.



а)



б)

Рис. 8.4 – Криві втомної міцності деталей із сплавів ВТ8 (а) і ЭП718 (б) при різних видах фінішної обробки: 1 - нормалізуюча термообробка; 2 – віброгалтовка; 3 – ультразвукове зміцнення; 4 – гідродробоструменеве зміцнення кульками діаметром 1,6 мм; 5 – дробоструменеве зміцнення сталевими кульками діаметром 0,1-0,2 мм

Поверхнєве пластичне деформування призводить до значного підвищення характеристик конструктивної міцності деталей машин, виготовлених зі сталей, чавуну, кольорових металів та сплавів; втомлювальної міцності, контактної витривалості, контактної жорсткості, зносостійкості, корозійної стійкості та ряду інших механічних характеристик. Особливо ефективним є застосування обробки ППД деталей із різноманітними концентраторами напружень. Збільшення границі

витривалості при багатоцикловій втомлюваності тим вищі, чим більша концентрація напружень. В такому випадку ППД, як зміцнюючий метод обробки має перевагу у порівнянні з термічними і хіміко-термічними методами.

В таблиці 8.1 приведені результати дослідження мало циклової втомлюваності гладеньких зразків на базі 8-10 цикл / хв [34]. ППД дає суттєве підвищення довговічності в порівнянні із шліфуванням, причому найбільше підвищення довговічності (в 3-7,5 разів) було досягнуто при обкочуванні роликком.

Таблиця 8.1 - Довговічність зразків в залежності від методу обробки

Спосіб обробки	Число циклів до руйнування при σ_{\max}				
	1360 МПа			1000 МПа	
	30ХГСА	08Х17Т	ВКС2Ю	ВНС5	ВНС2
1	2	3	4	5	6
Шліфування	7400	6900	7400	20750	19280
Віброшліфування	19100	19700	30000	-	53650
Вібронаклеп	21000	20300	22800	96300	105100
Обдування дробом	24000	22300	-	76300	-
Пневмодинамічний наклеп	-	35500	48400	88700	-
Обкатка роликком	24500	42000	>100000 0	44000	150000
Алмазне вигладжування	-	-	35161	180000	-
Обдування металічним піском	12500	11200	21000	70000	85040
Обдування кварцовим піском	-	-	-	-	48500

Існують експериментальні роботи, що вказують на підвищення контактної витривалості деталей після обробки ППД. Зміцнення зразків зі сталі 20ХНЗА шариком, діаметр якого 10 мм, при тискові 2800 Н/мм² підвищили їхню довговічність при терті кочення на 34-50 % в порівнянні зі шліфованими після цементації і термічної обробки зразками.

Л.І. Маркусом встановлено, що зразки, виготовлені зі сталі ШХ15 і зміцненні алмазним вигладжуванням, більш довговічні (при 50%-ній можливості руйнування – в 1,7, а при 10%-ній – в 3,5 рази), ніж зразки, оброблені суперфінішуванням .

Відомо, що різноманітні корозійні середовища чинять негативний вплив на втомну міцність деталей. Дослідженнями багатьох учених встановлено, що обробка ППД сприяє усуненню дії агресивних середовищ на втомну міцність. Наприклад, накатування сталі 40Х дозволило повністю

ліквідувати вплив корозійного ефекту; деталь мала одну і ту ж границю стійкості при дослідженні на повітрі та у воді [37]. Експерименти підтвердили великі значення стискаючих залишкових напружень при обкочуванні роликком (при обробці сталей 30ХГСНА і ЄІ643 вони складають 2000 Н/мм^2), значно менші значення отримуються при обробці тих же матеріалів шліфуванням (500 Н/мм^2), віброшліфуванням (800 Н/мм^2), наклепом дробом (1300 Н/мм^2), обдуванні металічним піском (1100 Н/мм^2), вібронаклепом (1500 Н/мм^2), алмазним вигладжуванням (1800 Н/мм^2) [38]. А значення стискаючих залишкових напружень суттєво впливають на зносостійкість деталі при її подальшій експлуатації.

Сьогодні не підлягає сумніву ефективність ППД як методу підвищенні зносостійкості деталей, що працюють в умовах тертя зі змащуванням. В даному випадку збільшується довговічність і, відповідно, початкове зношування в період роботи за рахунок створення оптимального мікрорельєфу поверхневого шару деформуванням.

В залежності від конкретних умов роботи деталі в машині, той чи інший параметр якості поверхневого шару має максимальний вплив на конструктивну міцність.

При ППД за рахунок пластичної деформації вихідних нерівностей формується шорсткість з малою висотою, великими значеннями відносної опорної довжини профілю, збільшеними радіусами кривизни вершин і впадин нерівностей. Така форма нерівностей в порівнянні зі зміцненням металу збільшує зносостійкість пар тертя, контактну жорсткість стиків і знижує здатність поверхонь до зношування. Останнє особливо важливо для гумово-манжетних ущільнень. При роботі в парі з поверхнею, обробленою ППД, спостерігається суттєве зниження зношування ущільнення і зменшення (в десятки разів) витікання мастила.

8.2. Характер зміцнення поверхневого шару методом ППД

Для розвитку процесів ППД нами було досліджено вплив технологічних на характер напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару деталі, а також величину використаного ресурсу пластичності.

Дослідження НДС пластичної зони при втискуванні в заготовку кульки і ролика проводили методом координатних подільних сіток із використанням методики, основаної на теорії R -функцій. Типовий характер розподілу в зоні відбитку ізоліній інтенсивності деформацій $\varepsilon_u = const$ і показника напруженого стану $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень, показаний на рис. 8.5.

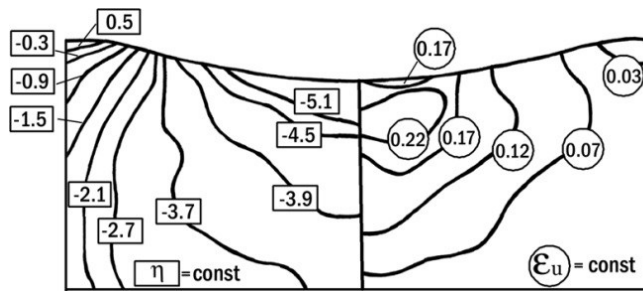


Рис. 8.5. Розподіл в зоні пластичного відбитку ізоліній: $\eta = const$ (□) і $\varepsilon_u = const$ (○)

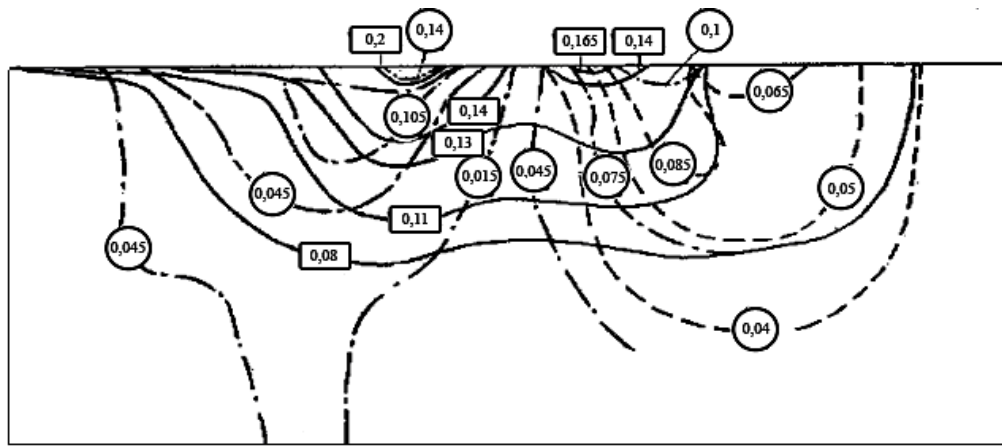
Як видно з рис. 8.5, характер деформованого стану в зоні відбитку є досить нерівномірним. Інтенсивність деформації поблизу поверхні становить лише 50-80% від максимальної. Найбільша деформація спостерігається в центрі відбитку на глибині $\approx 0.1d$ (від поверхні відбитку), де d -діаметр відбитку. Максимальна інтенсивність деформації в зоні відбитку приблизно становить $\varepsilon_u^{\max} \approx (0.4..0.5)d/D$, а глибина пластичної зони $h_{pl} = (1.4...1.6)d$, де d и D – діаметр відбитку і кульки відповідно.

Отже, якщо необхідно сформувати тонкий сильно зміцнений шар, то слід застосовувати кульки малого діаметра, призначаючи багато перехідний процес з максимальною відносною глибиною відбитку. При необхідності формування глибокого, помірно зміцненого шару, слід призначати мало перехідний процес ППД кульками відносно більших розмірів.

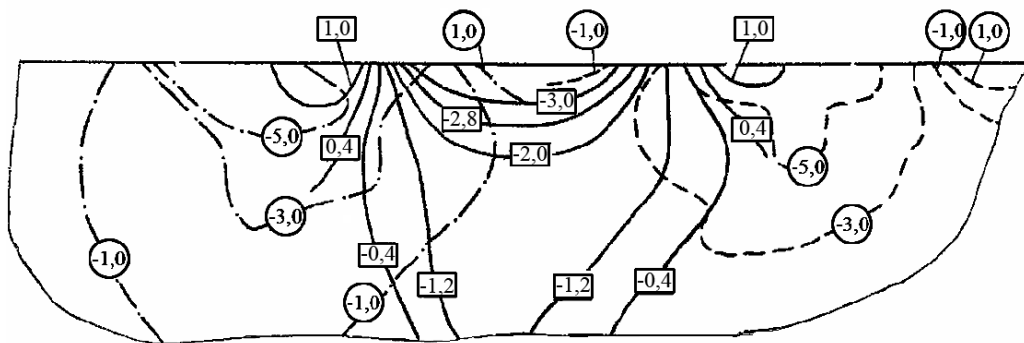
В результаті багатократного послідовного втискування інструменту при ППД відбувається зміщення часток металу у різних напрямках, що приводить до зміни знаку компонент деформацій та напружень.

На рис. 8.6. показаний характер розподілу ізоліній інтенсивності деформацій і показника напруженого стану при трьохкратному втискуванні ролика. Показник напруженого стану змінюється від величин, що відповідають усесторонньому стиску ($\eta = -5...-3$) на осі симетрії відбитку, до зсуву-розтягу ($\eta \geq 0$) на краю відбитку, в місці утворення пластичного валика. При втискуванні інструменту на ділянці між відбитками, показник η зростає через зменшення гідростатичного підпору зі сторони відбитків. В центрі заново утвореного відбитку він становить $\eta = -2...-4$, а на його межі $\eta = 0...1$.

Інтенсивність напружень матеріалу поверхневого шару заготовки при ППД, а з урахуванням єдності кривої плинину, і інтенсивність деформацій, можна визначати також шляхом вимірювання твердості (мікротвердості). Підвищення твердості пов'язано із дробленням кристалів на фрагменти і блоки, викривленням кристалічної решітки на їх границях, збільшенням дислокацій і вакансій. Все це приводить до збільшення твердості і міцності.



а)



б)

Рис. 8.6. Характер розподілу інтенсивності деформацій $\varepsilon_u = const$ а) і показника напруженого стану $\eta = const$ б) при трьохкратному втискуванні ролика діаметром 12 мм (ширина відбитку 2,5 мм, відстань між першим і другим відбитками 2 мм), після втискування: _ першого; другого; третього.

Поряд зі зміцненням, в поверхневому шарі відбувається розміщення металу, викликане ефектом Баушінгера через зміну знака деформації. Особливо інтенсивне розміщення спостерігається при перенаклеп і великому накопиченні пошкоджень, що призводить до подальшого зниження твердості і міцності оброблюваного металу. Отже, головними факторами зменшення твердості є:

а) прояв ефекту Баушінгера, що полягає в знакозмінних деформаціях - посилюється зі зростанням пластичної хвилі, а значить, з ростом глибини деформування;

б) наявність контактної тертя і підвищення температури в зоні контакту;

в) перенаклеп металу і вичерпання ресурсу пластичності.

В якості досліджуваного процесу ППД нами був прийнятий процес обкочування циліндричних заготовок роликками і кульками. Для реалізації процесу були спроектовані обкатники, які передбачають обкочування деталей на токарних верстатах.

На рис. 8.7 представлений обкатник, що забезпечує використання кульок різних діаметрів. Зусилля на кульки та глибина їх проникнення в

матеріал деталі регулюється пружиною.

Для формування максимально зміцненого шару металу поблизу самої поверхні деталі, наряду зі збільшенням товщини зміцненого шару, спочатку обкочування здійснюється кульками більшого діаметру, з подальшим переходом на кульки меншого діаметру. При цьому визначаючою якістю поверхневого шару є інформація про величину і характер розподілу накопиченої деформації та використаного ресурсу пластичності ψ_u . Тому деформування передбачає обмеження за величиною використаного ресурсу пластичності металу.

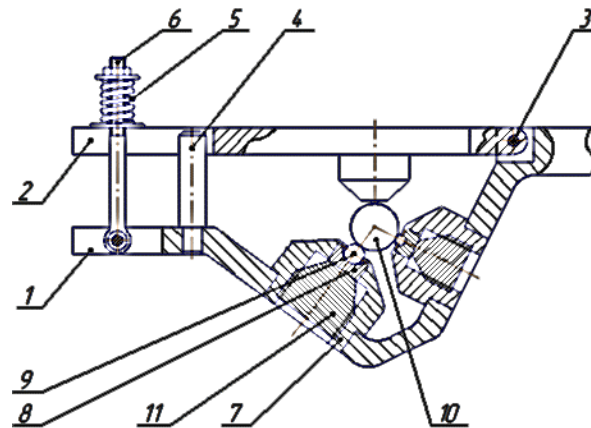


Рис. 8.7. Загальний вид обкатника. 1 – основа, 2 – рухомий важіль, 3 – вісь важеля, 4 – напрямний штифт, 5 – пружина, 6 – відкидний болт з гайкою, 7 – корпус, 8 – кулькова опора, 9 – кулька, 10 – деталь, що обробляється, 11 – гвинтовий притиск.

Величину ψ_u металу поверхневого шару при ППД доцільно розраховувати з використанням тензорних моделей накопичення пошкоджень.

При ППД відбувається складне багатоетапне деформування, тому для оцінки деформовності слід використовувати критерії, що враховують направлений характер пошкоджуваності і, відповідно, анізотропію пластичності деформованого металу. Згідно з тензорно-нелінійною моделлю компоненти девіатора пошкоджень можна надати у вигляді:

$$\psi_{ij}(\tilde{\varepsilon}_u) = \int_0^{\tilde{\varepsilon}_u} \left\{ [a_1(D) - b_1(D)] \beta_{ij}(\varepsilon_u) + b_1(D) \left[\beta_{ik}(\varepsilon_u) \beta_{kj}(\varepsilon_u) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right] \right\} f(\varepsilon_u / \varepsilon_*) d\varepsilon_u, \quad (8.1)$$

где $\tilde{\varepsilon}_u$ - накопичена деформація;

a, b – параметри моделі, що залежать від матеріалу та показників НДС;

$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\varepsilon_u}$ - спрямовуючий тензор приросту деформацій;

$d\varepsilon_{ij}$ - компонента тензора приросту деформацій;

$d\varepsilon_u = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}$ - інтенсивність приросту деформацій.

Функцію f можна представити у вигляді

$$f(\varepsilon_u) = \frac{n}{\varepsilon_*} \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_*} \right)^{n-1}, \quad n \geq 1. \quad (8.2)$$

При складному двоетапному деформуванні, коли в межах кожного етапу $\beta_{ij} = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$, відповідно до моделі (8.1) з урахуванням (8.2), отримаємо:

$$\psi_2 = \left[\psi_1^n (a^n - I) + \sqrt{\psi_1^{2n} (I^2 - 1) + 1} \right]^{\frac{1}{n}} - \psi_1 a, \quad (8.3)$$

$$\psi_1 = \frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_*^{(1)}}, \quad \psi_2 = \frac{\tilde{\varepsilon}_* - \varepsilon_u^{(2)}}{\varepsilon_*^{(2)}}, \quad a = \frac{\varepsilon_*^{(1)}}{\varepsilon_*^{(2)}}.$$

де $\varepsilon_u^{(1)}$ - деформація на першому етапі;

$\tilde{\varepsilon}_*$ - накопичена деформація до руйнування;

$\varepsilon_*^{(1)}, \varepsilon_*^{(2)}$ - гранична деформація, що відповідає напруженому стану і виду деформації на першому і другому етапах;

I – інваріантний параметр;

ψ_1 і ψ_2 використаний ресурс пластичності на першому етапі і залишковий ресурс пластичності на другому етапі, відповідно.

Процес складного багатоетапного деформування при ППД в локальних зонах заготовки є близьким до схем розтягу (пластична хвиля) і стиску (під деформуючим тілом), а також зсув-стиск, стиск-розтяг.

Спрощеною моделлю процесу є циклічне повторення певної комбінації двоетапного деформування. Згідно з (8.1), (8.2) на кінець N -го циклу компоненти тензора пошкоджень визначаються виразом:

$$\begin{aligned} \psi_{ij} = & \left[\left(a^{(1)} - b^{(2)} \right) \beta_{ij}^{(1)} + b^{(1)} \left(\beta_{ik}^{(1)} \beta_{kj}^{(1)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \psi_1^n \times \\ & \times \left[\sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-2)^n \right] + \\ & + \left[\left(a^{(2)} - b^{(2)} \right) \beta_{ij}^{(2)} + b^{(2)} \left(\beta_{ik}^{(2)} \beta_{kj}^{(2)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \psi_2^n \times \\ & \times \left[\sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-1)^n \right] \end{aligned} \quad (8.4)$$

де a і b - першообразні функції a_1 і b_1 .

Індекс вверху вказує на належність до непарного «1» і парного «2» півциклів деформування. При виведенні співвідношення (8.4) вважали, що деформація на всіх півциклах однакова, проте в загальному випадку $\psi_1 \neq \psi_2$ за рахунок того, що $\varepsilon_*^{(1)} \neq \varepsilon_*^{(2)}$.

Позначимо:

$$S^{(1)} = \sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-2)^n, \quad S^{(2)} = \sum_{l=1}^N (2l)^n - \sum_{l=2}^N (2l-1)^n. \quad (8.5)$$

Використовуючи квадратурні формули метода трапецій, отримаємо:

$$\sum_{l=1}^N (2l-1)^n \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 + (2N-1)^n + \frac{1}{n+1} \left[(2N-1)^{n+1} - 1 \right] \right\};$$

$$\sum_{l=1}^N (2l-2)^n \approx \frac{1}{2} \left[2^n + (2N-2)^n + \frac{(2N-2)^{n+1} - 2^{n+1}}{n+1} \right].$$

Тоді:

$$S^{(1)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{n}{n+1} + (2N-1)^n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^n \right] + \frac{(2N-1)^{n+1}}{n+1} \left[1 - \left(\frac{1}{2N-1} \right)^{n+1} \right] - 2^n \frac{n-1}{n+1} \right\}.$$

Розклавши в ряд Тейлора і утримуючи лише два перших члени, отримаємо:

$$\left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^n \approx 1 - \frac{n}{2N-1}, \quad \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^{n+1} \approx 1 - \frac{n+1}{2N-1},$$

Враховуючи, що $2N \gg 1$, а $1 < n < 1.5$, після нескладних перетворень отримаємо:

$$S^{(1)} = 0.5(2N)^n \quad (8.6)$$

Аналогічно:

$$S^{(2)} = S^{(1)} \quad (8.7)$$

Використовуючи квадратичну міру пошкоджень $\psi_u = \psi_{ij} \psi_{ij}$ ($0 \leq \psi_u \leq 1$), відповідно до (4) – (7), отримаємо:

$$\psi_u = \frac{1}{4} (2N)^{2n} \left[\psi_1^{2n} + 2I(\psi_1 \psi_2)^n + \psi_2^{2n} \right] \leq 1. \quad (8.8)$$

Використовуючи даний вираз можна визначити використаний ресурс пластичності у випадку багатоетапного ППД.

8.3. Моделювання процесу обкочування заготовки роликком

При розгляді процесу пластичної деформації поверхневого шару, зокрема при деформуванні роликком плоскої поверхні виникає цілий ряд завдань. Однією з них є визначення використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі. Розглянемо пластичний контакт при коченні з ковзанням жорсткого ролика вздовж плоскої поверхні ідеально-пластичного

півпростору. При цьому вважаємо, що пластичний стан в зоні контакту є стаціонарним. Початкове рішення для ковзання циліндра з пластичного напівпростору розглянуто Б. А. Друяновим і Н.М. Михиным, кочення, гладкого циліндра досліджувався Е. А. Маршалом, В. Ф. Коллінз розглядав ковзання шорсткого циліндра. В. М. Сегалом запропоновано рішення задачі при довільному терті між роликом і матеріалом. При цьому досліджувалися зусилля і момент, які діють на циліндр і розподіл контактних напружень по поверхні матеріалу, який обробляється.

Грунтуючись на відомих результатах моделювання процесів ОМТ методом скінчених елементів нами було вирішено для розв'язку задачі пластичного деформування поверхневого шару заготовки використовувати програму LS-DYNA. Дана програма дозволяє моделювати НДС під час пластичного деформування матеріалів, взаємодію контактних поверхонь інструмента та заготовки з врахуванням тертя.

Введення початкових даних виконується з командного файлу. Для візуалізації результатів імітаційного моделювання та їх наступного аналізу використовували препроцесор LS-PREPOST, що входить до складу пакету LS-DYNA.

Для моделювання процесу обкочування роликом нами використовувались 8-вузлові скінчені елементи (SOLID164).

Для зменшення часу моделювання процесу формозміни, інструмент був представлений у вигляді абсолютно твердого тіла (*MAT_RIGID).

Контакт між заготовкою та інструментом визначається за допомогою автоматичного контактного алгоритму типу “поверхня-поверхня” (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE).

Для опису процесу формозміни матеріалу з врахуванням швидкостей деформування було використано модель, що враховує кінематичне зміцнення та дозволяє описати залежність межі текучості від швидкості деформування. Для моделювання обрано кусочно-лінійну пластичну модель (Piecewise Linear Plasticity Model).

Після проведення розрахунків була проведена обробка отриманих даних за допомогою постпроцесора LS-PREPOST.

Таким чином, можна зробити висновок, що при аналізі процесу обкочування роликом розрахунок параметрів НДС методом скінчених елементів дає не тільки якісну, але й кількісну оцінку розподілу характеристик НДС.

Моделювання проходить у кілька етапів:

- геометрична модель будується
- задаються тип матеріалів і їх властивості;
- присвоюються атрибути (матеріал, тип кінцевого елемента) елементам геометричній моделі;
- розбивається модель на кінцеві елементи (рис. 8.8);
- задаються граничні умови (закріплення моделі і діючі сили);
- вирішується завдання;
- проглядаються результати.

В даній моделі розглядається обкатка сталевго валу (Сталь 45), роликм діаметром 50мм, з профільним радіусом – 5 мм. Аналіз отриманих результатів показує, що мають місце три зони деформування [3]: область випередження область налипання або область безпосередньо контакту ролика і деталі; область відставання. Формування всіх зон добре видно на рис. 8.8.

У зоні пластичної хвилі відбуваються значні деформації при несприятливій схемі напруженого стану (рис.8.9). Показник напруженого стану η в цій зоні змінюється від $\eta=0,71$ до $\eta=1,6$, а параметра Надаї –Люде μ_σ змінюється від $\mu_\sigma = -0,3$ до $\mu_\sigma = -0,4$.

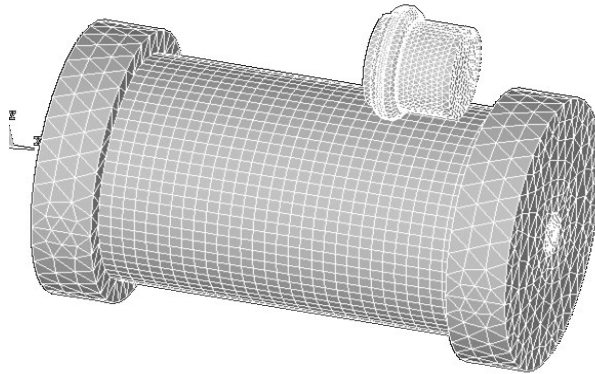
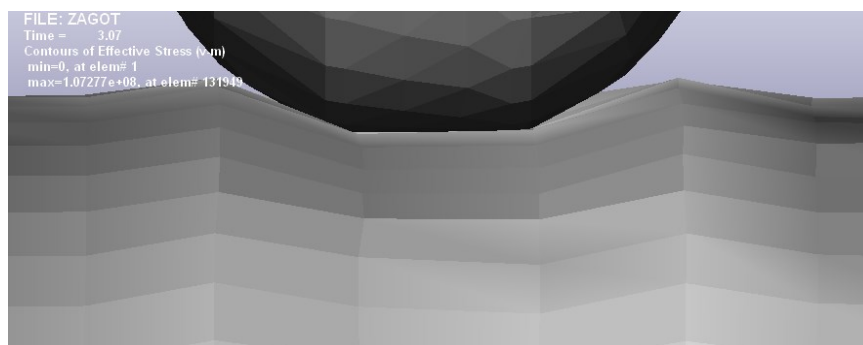
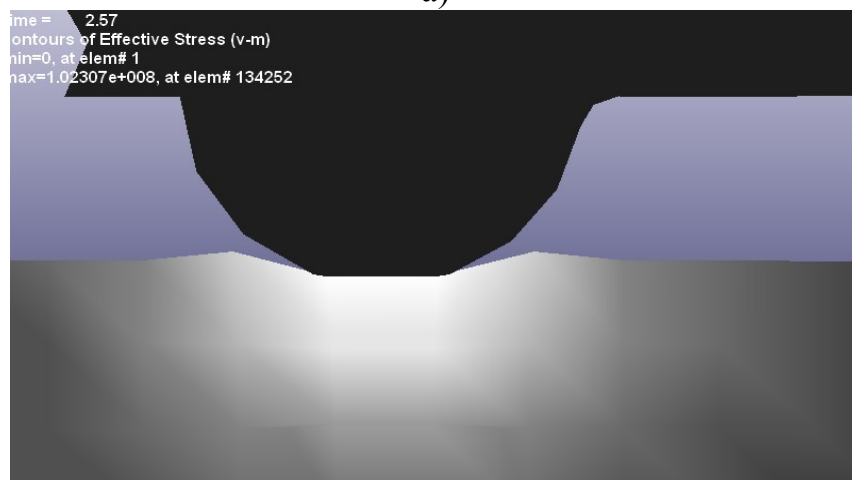


Рис. 8.8 – Геометрична модель розбиття на кінцеві елементи



a)



б)

Рис. 8.9 – Утворення платичної хвилі перед роликом та після нього на поверхні деталі (а) та у розрізі (б)

В зоні контакту деталі та інструменту відбуваються основні деформації (рис. 8.10), однак збільшення використаного ресурсу пластичності незначно. У цій області показники $\eta = -0,75 \dots -0,7$, $\mu_{\sigma} = 0,2 \dots 0,3$, тобто має місце схема всебічного стиснення. При переході частки з першої в другу зону внаслідок інтенсивних деформацій в умовах гідростатичного стиску можливо заліковування деяких дефектів.

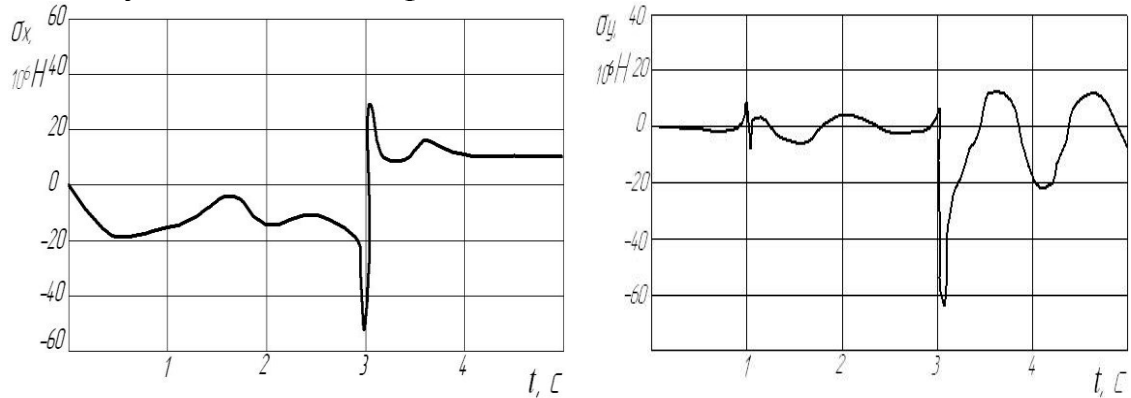


Рис. 8.10- Нормальні напруження

Таким чином, незворотна пошкодженість металу поверхневого шару деталі при обкачуванні відбувається в основному, в зоні пластичної хвилі, а саме в її вершині. Ця пошкодженість частково може лікуватися, а решта буде визначати експлуатаційні характеристики поверхневого шару деталі. (рис. 8.11 та 8.12)

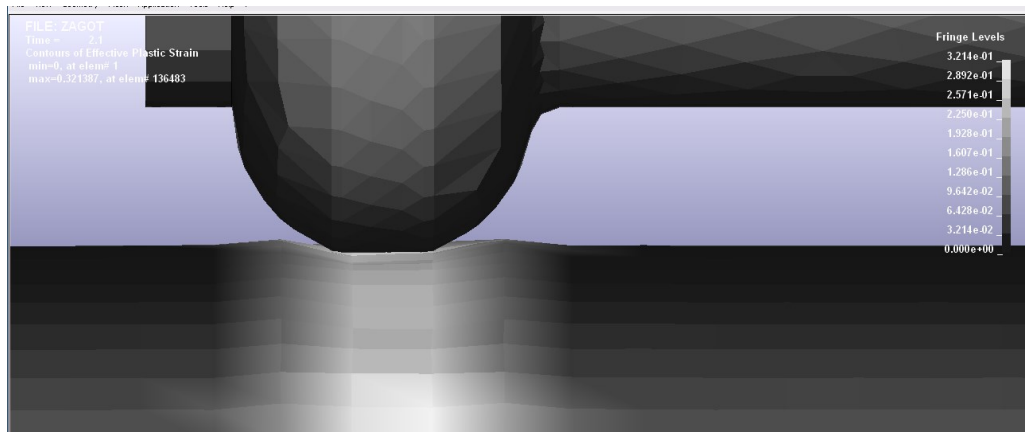


Рисунок 8.11 – Пластичні деформації

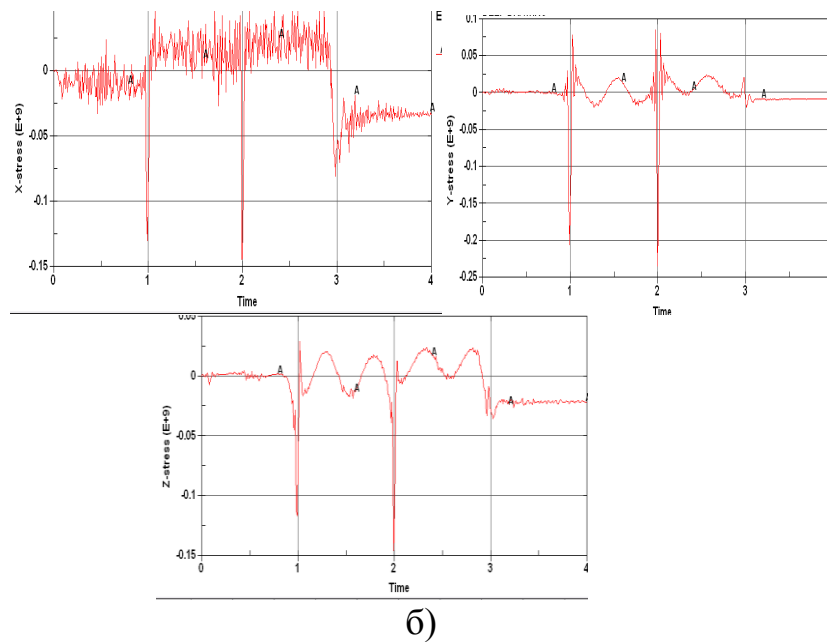
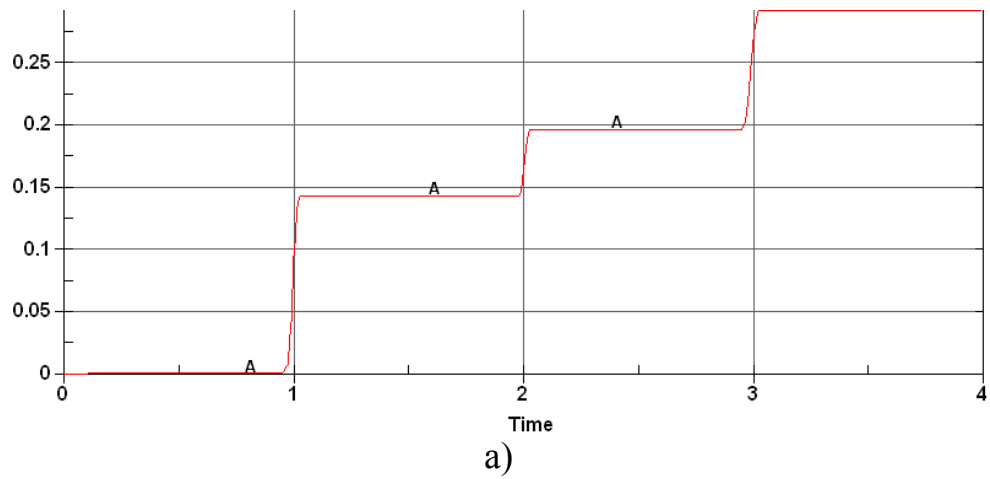


Рис. 8.12 - Пластична деформація (а) та головні напруження (б) отримані МСЕ

. При переході частинки з першої в другу зону внаслідок інтенсивних деформацій в умовах гідростатичного стиснення можливо заліковування деяких дефектів. У зоні АВ відносно низький рівень приросту деформацій і відповідно зростання пошкодження незначний (рис. 8.13).

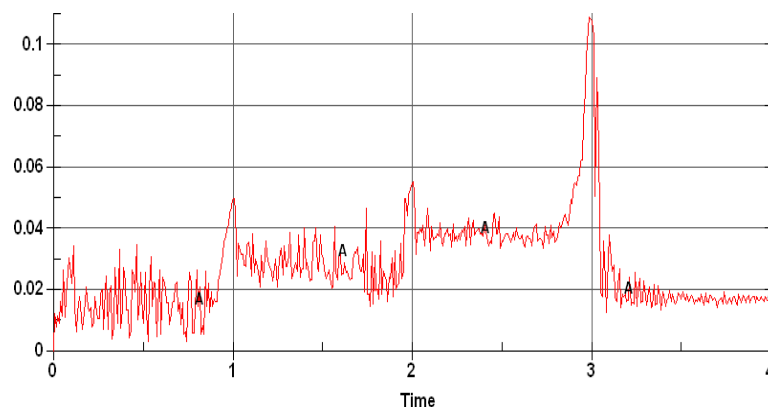


Рис. 8.13 – Інтенсивність напружень

Таким чином, незворотня пошкодженість металу поверхнього шару деталі при обкочуванні відбувається здебільшого в зоні пластичної хвилі, а саме в її вершині. Ця пошкодженість частково може заліковуватися, а частина що залишиться буде визначати експлуатаційні характеристики поверхнього шару деталі.

8.4. Інструмент процесу обкочування заготовки роликком

При пластичній деформації одночасно з процесами зміцнення ідуть процеси пластичного розрихлення. Установлено, що при значеннях величини використаного ресурсу пластичності $\psi > 0,6$ інтенсивність процесів накопичення пошкоджень значно перевищує інтенсивність зміцнення. Тому величина ψ при поверхньому пластичному деформуванні не повинна перевищувати цього значення.

Відомий ролик для обкочування металевих деталей, робочий профіль якого виконаний у вигляді циліндричної спіралі з кроком, більшим ширини деформувального виступу робочого витка, а діаметр не кратний діаметру оброблюваної деталі, який відрізняється тим, що профіль перерізу деформувальних виступів робочих витків виконаний за радіусом, рівним $0,25-0,3$ діаметра ролика, а рекомендоване значення коефіцієнта зміцнення циліндричної спіралі ролика за один оберт зміцнюваної деталі ($0,45 \dots 0,55$) ширини смуги зміцнення.

Недоліком відомого ролика є необхідність забезпечення коефіцієнта зміцнення циліндричної спіралі ролика α за один оберт зміцнюваної деталі рівним $0,5$, що конструктивно не завжди можливо досягнути, якщо ж відповідно до рекомендацій приймати його в межах ($0,45 \dots 0,55$), можливе виникнення перенаклепу зміцнювальних поверхонь і викликане ним зниження границі витривалості (при α в межах $0,45 \dots 0,5$), або формування нерівномірного рівня залишкових напружень у приповерхневих шарах металу, і, як наслідок, зниження опору утомі деталі (при α в межах $0,5 \dots 0,55$)

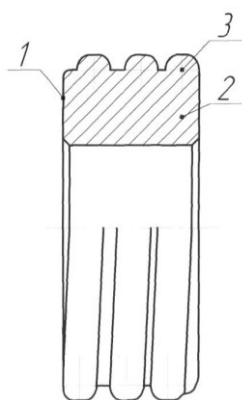


Рис. 8.14 – Ролик для обкочування металевих деталей

Тому, на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено конструкцію ролика, в якому робочий профіль

виконаний у вигляді циліндричної спіралі з змінним кроком від $2b$ до $0.5b$, де b – ширина смуги зміцнення; що дозволяє при зміщені кожної із смуг зміцнення при одному оберті оброблюваної деталі забезпечувати необхідне перекриття зазначених смуг, без виникнення перенаклепу зміцнюваних поверхонь і за рахунок чого отримується рівномірний розподіл пластичних деформацій та залишкових напружень по довжині поверхні, що обкатується.

На рис. 8.15 показаний вид ролику для обкочування металевих деталей. Циліндрична спіраль 3 і опорний циліндр 2 виконані як одне ціле.

Ролик працює наступним чином. Ролик монтується з можливістю вільного обертання в підшипниках тримача. Силовий механізм закріплюється в різцетримачі токарного верстату. Після включення обертання шпинделя верстату ролик підводиться до деталі, силовим механізмом пристосування для обкочування створюється необхідне зусилля і ролик під дією подачі верстату переміщується вздовж оброблюваної поверхні, обертаючись разом із деталлю. Процес обробки проходить за один або два проходи, за один установ і за одну операцію, що робить його високопродуктивним і високоякісним.

При вдавлюванні та обкочуванні напруження σ_x , σ_ϕ стискуючі, а напруження σ_z стискує під роликом, але розтягує перед та після нього на поверхні деталі. Це підтверджує складний напружений стан в поверхневому шарі при вдавлюванні та обкочуванні деталі роликом.

Для перевірки отриманих результатів моделювання обкочування тороїдальним роликом (рис. 8.15) виконано експериментальне дослідження твердості поверхневого шару металу, результати яких наведені в таблиці 8.2. Стан поверхні після ППД показано на рисунку 8.16.

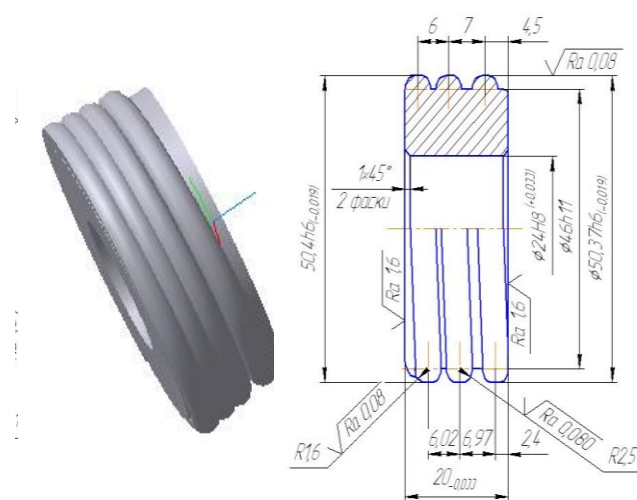


Рис. 8.15 - Інструмент для ППД

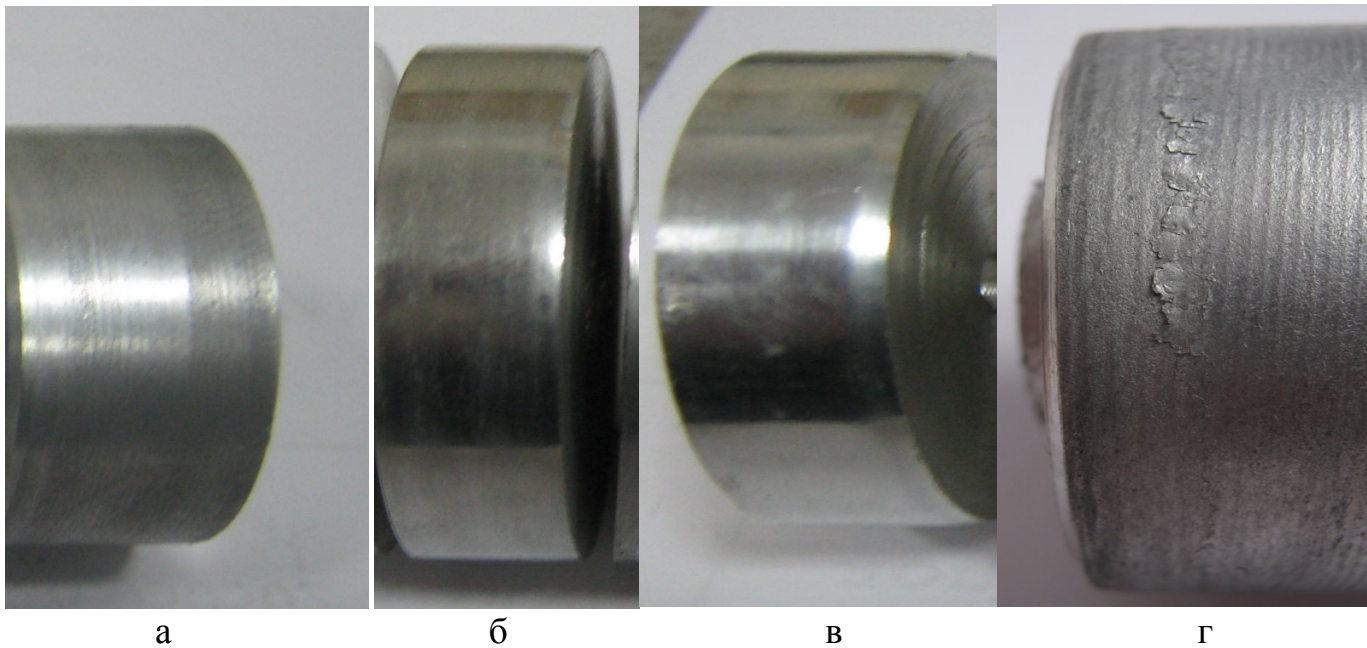


Рис. 8.16 - Поверхні після ППД

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що немонотонність навантаження обумовлена тим, що перед роликком та після нього виникає хвиля, в якій мають місце напруження розтягу, тоді як під роликком виникає напружений стан всестороннього стиску. Крім того, при зміні напрямку обкочування змінюється знак дотичних напружень, що сприяє частковому заліковуванню мікротріщин і, відповідно, зменшенню величини використаного ресурсу пластичності

Таблиця 8.2 – Твердість поверхневого шару

Вид обробки	Твердість, НВ
Вихідна	92,3
Обкатка інструментом тороїдальної форми за один прохід (рис. 8.16 а)	125,4
Обкатка інструментом с гвинтовою робочою поверхнею (рис. 8.16б)	131,3
Обкатка інструментом с гвинтовою робочою поверхнею в прямому і зворотньому напрямі (рис. 8.16 в)	172,7
Обкатка інструментом тороїдальної форми за два прохода в одному напрямку (рис. 8.16 г)	132,6