РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Основні положення обробки металів тиском

В основі обробки металів тиском (ОМТ) лежить процес пластичної деформації, при якому змінюється форма без зміни маси. Усі розрахунки розмірів і форми тіла при обробці тиском засновані на законі сталості об'єму, суть якого полягає в тому, що об'єм тіла до і після пластичної деформації приймається незмінним: $V_1 = V_2 = const$ (V_1 і V_2 – об'єми тіла до і після деформації).

Зміна форми тіла може відбуватися в напрямку трьох головних осей; при цьому кожна точка прагне переміщатися в тому напрямку, в якому створюється найменший опір її зміщенню. Це положення в теорії обробки металів тиском називається законом найменшого опору.

При вільній формозміні тіла в різних напрямках найбільша деформація відбувається в тому напрямку, у якому більшість точок, що переміщаються, зустрічає найменший опір своєму переміщенню.

Так, наприклад, якщо при прокатуванні в двох валках з поперечними насічками (рис. 1.1, а) плин металу уздовж осі прокатки стримується, а в поперечному напрямку збільшується, то при кругових насічках (рис. 1.1, в) буде спостерігатися зворотне явище.

Іншим прикладом чинності закону найменшого опору може служити перетворення квадратного перетину (чи будь-якого іншого) зразку при його осаджуванні в кругове (рис. 1.1). Це правило найменшого периметра при осаджуванні.

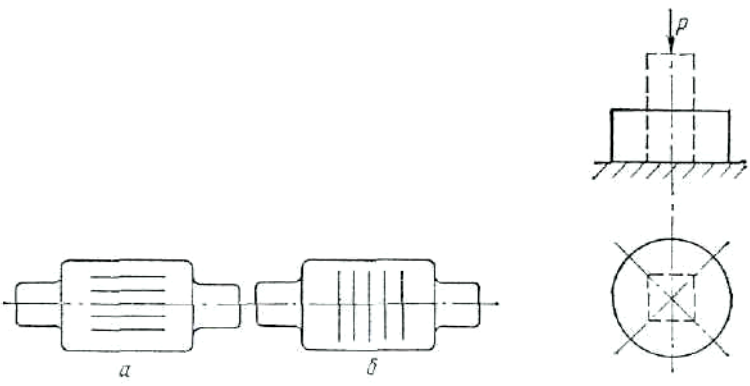

Рисунок 1.1 – Валок з поперечними (а) і круговими (б) насічками і схема осадки прямокутного зразка

Закони сталості об’єму і найменшого опору поширюються на всі способи обробки металів тиском.

При цьому закон сталості об’єму використовують для визначення розмірів заготовок, а закон найменшого опору дозволяє визначити, які розміри і форму поперечного переріза одержить заготовка з тим чи іншим перетином у процесі обробки тиском.

Будь-який процес обробки металів тиском характеризується осередком деформації і коефіцієнтом деформації. На рис. 1.2 показаний осередок деформації при подовжньому прокатуванні. Різниця висоти заготовки, що прокочується, до і після прокатки називається лінійним або абсолютним обтисненням: $\Delta h = h_0 - h_1$.

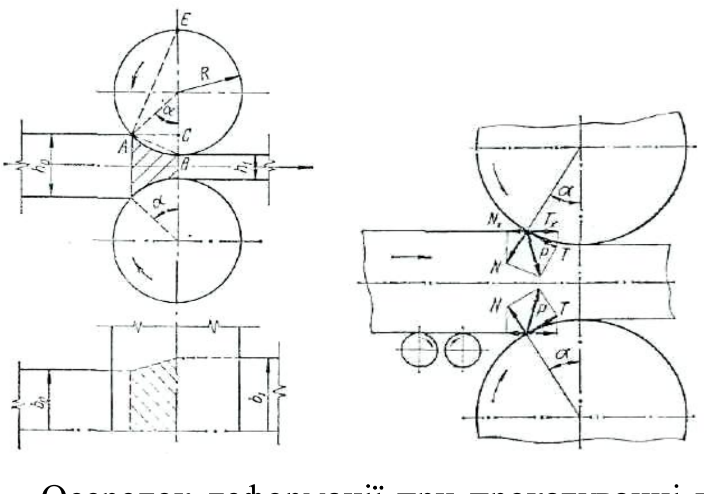

Рисунок 1.2 – Осередок деформації при прокатуванні та сили, що діють на метал при захопленні його валками

Відношення цієї величини до первісної висоти перетину заготовки, що прокочується, називається відносним обтисненням: $(h_0 - h_1)/h_0 = \Delta h/h_0$.

Різниця ширин перетинів металу, що прокочується, після прокатки і до прокатки називається розширенням: $\Delta b = b_1 - b_0$.

Як видно з рис. 1.4, метал при прокатуванні піддається деформації на деякій ділянці, яка по мірі обертання валків переміщується по металу, що прокочується. Ця ділянка називається поясом деформації і визначається дугою АВ, по якій валок стикається з металом, що прокочується.

АВ називається дугою захоплення, а кут α, утворений двома радіусами, проведеними з центра валка в точки А і В, – кутом захоплення, що при даному лінійному обтисненні можна визначити з рівняння:

$(h_0 - h_1)/2 = R - R \cdot \cos\alpha$; $\cos\alpha = 1 - (h_0 - h_1)/2R$.

Довжина дуги захоплення $l_д = \pi R \alpha^o/180$.

При малих кутах захоплення (< 20)° дуга захоплення може дорівнювати хорді, і тоді рівняння прийме вид, більш зручний для практичного користування. Як видно з рис. 1.2 Δ АВС подібний Δ АВЕ, отже, $AB/BP = BE/AB$, тоді $(AB)^2 = BE \cdot BP$, тобто

$$(AB)^2 = 2R(h_0 - h_1)/2 \text{ і } AB = \sqrt{}(h_0 - h_1),$$

а тому що $h_0 - h_1 = \Delta h$, то $AB = l_д = \sqrt{}R\Delta h$.

Процес прокатки забезпечується тертям між металом і валками. У момент захоплення металу з боку кожного валка будуть діяти на метал дві сили (без обліку інерційних сил): нормальна сила N і дотична сила тертя T (рис. 1.2). Для того, щоб відбулося втягування металу в зьов валків, необхідне дотримання умови $2T_x > 2N_x$ чи $T \cdot \cos\alpha > N \cdot \sin\alpha$. При цій умові результуюча сила P буде спрямована убік руху металу. Сила тертя T дорівнює нормальній силі N, помноженій на коефіцієнт тертя μ, причому відношення сили тертя до нормальної сили дорівнює тангенсу кута тертя ρ, тобто $T = \mu N$, $T/N = \mathrm{tg}\,\rho = \mu$. Отже, умову захоплення можна переписати у вигляді $2\mu N \cdot \cos\alpha > 2N \cdot \sin\alpha$, чи $\mu > \mathrm{tg}\,\alpha$, тобто $\mathrm{tg}\,\rho > \mathrm{tg}\,\alpha$ і остаточно $\rho > \alpha$.

За рахунок обтиснення валками довжина металу, що прокочується, через сталість об'єму буде збільшуватися. Відношення довжини (l_1) металу після виходу з валків до первісної довжини (l_0) називається витяжкою: $\lambda = l_1/l_0$. Практично за один прохід $\lambda = 1,1 - 1,6$, але в деяких випадках $\lambda \leq 3$.

По висоті смуга також змінює свої розміри; позначимо коефіцієнт деформації по висоті або коефіцієнт зменшення висоти $\gamma = h_1/h_0$, коефіцієнт деформації по ширині або коефіцієнт розширення $\beta = b_1/b_0$.

Визначимо взаємозв'язок розглянутих коефіцієнтів деформації. З умови сталості об'єму можна записати:

$$V_o = V_1 = h_0b_0l_0 = h_1b_1l_1 = \text{const}.$$

Позначимо площі поперечного перерізу штаби до і після прокатки відповідно $F_0 = h_0b_0$ і $F_1 = h_1b_1$, тоді:

$$F_0l_0 = F_1l_1 \text{ чи } F_0/F_1 = l_1/l_0 = \lambda.$$

Отже, відношення площин поперечного перерізу штаби зворотно пропорційне довжинам.

З рівняння $h_0b_0l_0 = h_1b_1l_1$ можна записати $h_1/h_0 = b_0l_0/b_1l_1 = \gamma$ і $b_1/b_0 = h_0l_0/h_1l_1 = \beta$.

І, нарешті, $h_1b_1l_1/h_0b_0l_0 = 1$ чи $\lambda\gamma\beta = 1$, тобто добуток коефіцієнтів деформації по висоті, ширині і довжині дорівнює одиниці. З останнього рівняння можна записати $\lambda = 1/\gamma\beta$. При прокатуванні в деяких випадках можна зневажати явищем розширення, тобто вважати $b_0 = b_1$ і $\beta = b_1/b_0 = 1$, тоді:

$$\lambda = 1/\gamma \text{ чи } \lambda = h_0/h_1.$$

Витяжка в цьому випадку дорівнює зворотній величині коефіцієнта зменшення висоти і буде виражатися відношенням площин або відношенням відповідних висот.

Розглянемо поняття про зміщений об'єм і швидкість деформації. Для цього використовуємо основне рівняння закону сталості об'єму $\lambda\gamma\beta = 1$. Логарифмуючи останнє рівняння, одержимо $\ln \gamma + \ln \beta + \ln \lambda = 0$, тобто сума натуральних логарифмів коефіцієнтів деформації по всім трьох напрямках дорівнює нулю.

Геометричний зміст останнього рівняння полягає в тому, що зменшення висоти викликає збільшення довжини і ширини. Якщо зсув по висоті позначити мінусовим знаком (висота зменшується), а по довжині і ширині плюсовим (і та, і інша збільшуються), то алгебраїчна сума зсувів, узятих в усіх напрямках, буде дорівнювати нулю.

Зіставляючи ці міркування з нашим рівнянням, можна зробити висновок, що натуральний логарифм коефіцієнта деформації в будь-якому напрямку являє собою питомий зміщений об'єм у тому ж напрямі, а сума таких питомих обсягів, взятих в усіх напрямках, дорівнює нулю.

Для підтвердження розглянемо випадок стиску циліндра під молотом або пресом (рис.1.3).

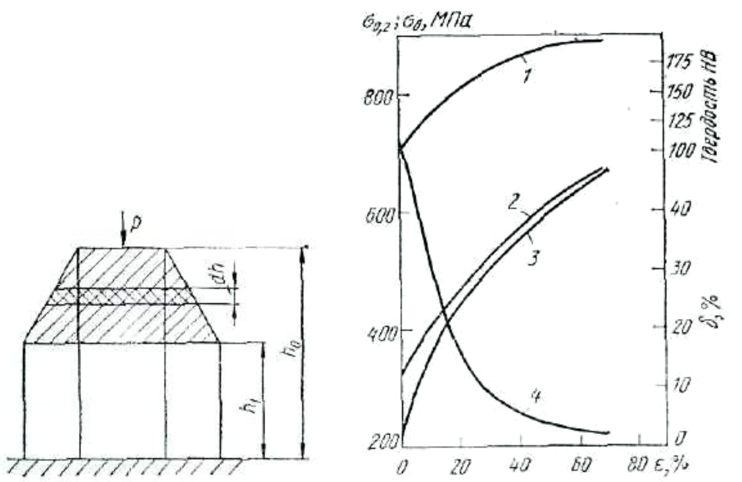

Рисунок 1.3 – Схема осаджування циліндра і залежність механічних властивостей вуглецевої сталі 08кп від ступеня деформації: 1– твердість НВ; 2 – $\sigma_в$; 3 – $\sigma_{0,2}$; 4 – δ

При деформації циліндра на нескінченно малу величину dh зміщений об'єм буде $dV_д = Fdh$ ($F = V/h$ – площа перетину).

Зважаючи на те, що обсяг циліндра незмінний: $V = const$, то $dV_д = V (dh/h)$.

Інтегруючи останнє рівняння, одержимо:

$$V_д = \int V dh/h = V \cdot \ln h$$

Зважаючи на те, що $h_0/h_1 = 1/\gamma$, то повний зміщений об'єм можна виразити так:

$$V_д = V \cdot \ln (1/\gamma),$$

тоді питомий зміщений об'єм дорівнює: $V_д/V = \ln (1/\gamma) = \ln \lambda$.

Зміщений об'єм служить також і мірою швидкості деформації, під якою звично мається на увазі відношення питомого зміщеного об'єму до проміжку часу, протягом якого зміщається цей об'єм. Якщо позначити питомий зміщений об'єм через $\ln \varepsilon$, а час зсуву цього об'єму в секундах через τ, то швидкість деформації можна виразити наступною формулою:

$$\nu_{деф} = \ln \varepsilon/\tau,\ c^{-1}$$

У результаті холодного пластичного деформування утвориться волокниста структура, метал одержує стан наклепу. Його міцність і твердість підвищуються, а пластичність і в'язкість знижуються, тобто відбувається зміцнення (нагартування) і збільшення крихкості металу.

Для обробки тиском істотно те, що зі збільшенням ступеня пластичної деформації границя текучості зростає швидше, ніж тимчасовий опір; при цьому процес зміцнення найбільш інтенсивно протікає при ступені деформації приблизно до 30 % (рис. 1.3). При ступені деформації 80 – 90 % пластичність металу знижується настільки, що подальша обробка тиском стає скрутною і може призвести до руйнування. Властивості наклепаного металу відновлюються при його нагріванні.

При невисокому нагріванні відбуваються процеси повернення, що призводять до деякого зниження міцності і збільшення пластичності. Повне відновлення вихідних механічних властивостей металу відбувається в результаті рекристалізації – процесу утворення і росту нових зерен при нагріванні до $t_{рек} = \alpha t_{пл}$ (де $t_{рек}$ і $t_{пл}$ – абсолютні температури початку рекристалізації і плавлення, К). Для вуглецевих сталей $\alpha = 0{,}4$ і $t_{рек} = 550 – 650$ °С. При утворенні великих зерен у процесі рекристалізації міцність і особливо пластичність металу знижуються. Величина зерна залежить від багатьох факторів: температури, тривалості нагрівання, ступеня попередньої пластичної деформації і т.д.

Температуру нагрівання і величину деформації, при сполученні яких відбувається максимальний ріст зерен металу, називають критичними. Так, наприклад, для низько вуглецевої сталі критичний інтервал ступеня деформації складає приблизно 5 – 10 %.

У реальних умовах деформації в широкому інтервалі температур процеси знеміцнення можуть протікати одночасно з процесом зміцнення. В залежності від того, в якому ступені при деформуванні встигають протікати процеси знеміцнення, розрізняють: 1) холодну пластичну деформацію, якщо вона не супроводжується процесами вороття і рекристалізації, а ступінь зміцнення при деформуванні поступово зростає; 2) неповну холодну пластичну деформацію, при якій відбувається тільки процес вороття, ступінь зміцнення менше, ніж при холодній деформації; 3) неповну гарячу пластичну деформацію, при якій встигають пройти вороття і частково рекристалізація, причому ступінь зміцнення виявляється ще менше; 4) гарячу пластичну деформацію, при якій встигають пройти всі основні процеси знеміцнення – вороття і рекристалізація без помітного зміцнення деформованого тіла.

Для підрахунку зусиль гарячої деформації металів і їх сплавів необхідно знати величину дійсного опору деформації при відповідних температурах, швидкостях і ступенях деформації.

Дійсний опір деформації – напруга, обумовлена як відношення зусилля розтягання до площі дійсного поперечного переріза зразка в даний момент деформації.

Величину дійсного опору деформації визначають на спеціальних установках – пластометрах, що дозволяють одночасно вимірювати основні параметри: температуру, ступінь і швидкість деформації.

На рисунку 1.4 представлений графік зміни дійсного опору деформації в залежності від основних термомеханічних параметрів: температури, ступеня і швидкості деформації.

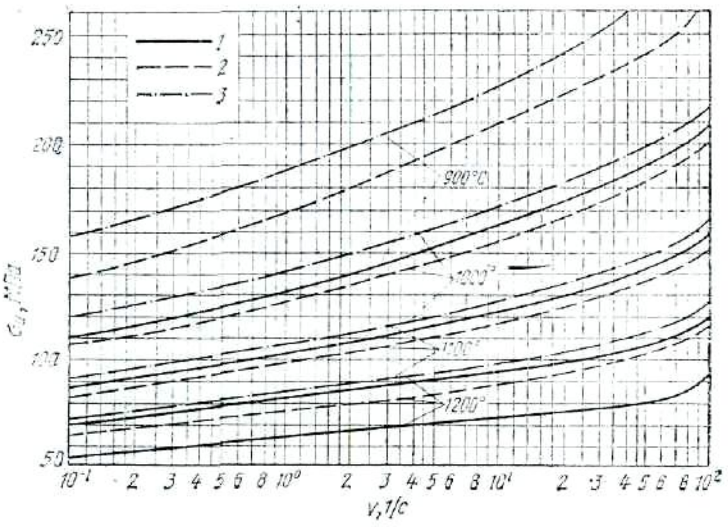

Рисунок 1.4 – Залежність дійсного опору деформації легованої сталі типу Х18Н9Т від температури, ступеня і швидкості деформації: 1 – ε = 10 %; 2 – 20 %; 3 – 40 %

1.2 Короткі відомості з теорії пластичної деформації металів

При будь-якому виді навантаження в матеріалі виникають нормальні і дотичні напруження. $S_n = S_0 \cdot Cos^2 J, \ \tau = 0{,}5 \quad S_0 \cdot Sin2J$

Площадки, по яким дотичні напруження не діють, називають головними площадками, а нормальні напруги, що діють по цим площадкам, – головними напруженнями.

Однак у більшості випадків матеріал піддається розтяганню або стиску по двом чи трьом напрямкам, тобто знаходиться в складному напруженому стані. В теорії пружності показано, що в кожній точці будь-якого напруженого тіла можна провести три взаємно перпендикулярні головні площадки, через які передаються три головних нормальних напруги: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

В кожній точці напруженого тіла можна виділити елементарний кубик, гранями якого служать головні площадки, по яким діють три взаємно перпендикулярні головні напруги.

В випадку простого розтягання (до утворення шийки на зразку) одна головна площадка в кожній точці перпендикулярна до осі стрижня, а дві інші паралельні цій осі. В цьому випадку тільки одна з трьох головних напружень не дорівнює нулю і спрямована паралельно силі, що розтягує; такий напружений стан називається лінійним (Л).

Якщо матеріал піддається розтяганню або стиску по двом взаємно перпендикулярним площадкам, то такий випадок називається плоским напруженим станом (П).

Якщо ж усі три головні напруги не дорівнюють нулю в розглянутій точці, то має місце схема об'ємного напруженого стану (О).

На рисунку 1.5 показано дев'ять можливих схем напруженого стану. За допомогою таких схем напруженого стану визначається пластичність металу – його стан, що залежить не тільки від хімічного складу й інших внутрішніх факторів, але і від схеми напруженого стану, тобто від способу деформування.

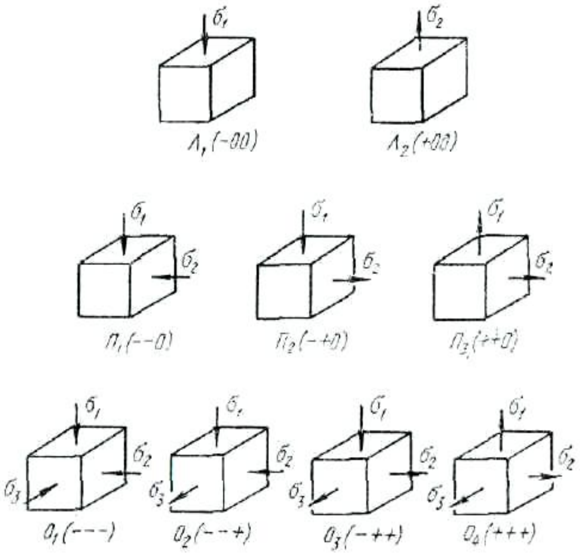

Рисунок 1.5 – Схеми напруженого стану

На рисунку 1.6 показані три основні схеми деформації. У першому випадку (схема D_I) метал надходить в одному напрямку, а йде в двох напрямках.

В другому випадку (схема D_{II}) метал надходить в одному напрямку, а йде в іншому. У третьому випадку (схема D_{III}) метал надходить в двох напрямках, а йде в одному напрямку.

Всі ці три схеми взаємозалежні і при цьому можливий перехід від однієї схеми до іншої в процесі деформування. Зважаючи на те, що число схем деформацій три, а схем напруженого стану дев'ять, то та сама схема деформації може бути здійснена при різних схемах напруженого стану.

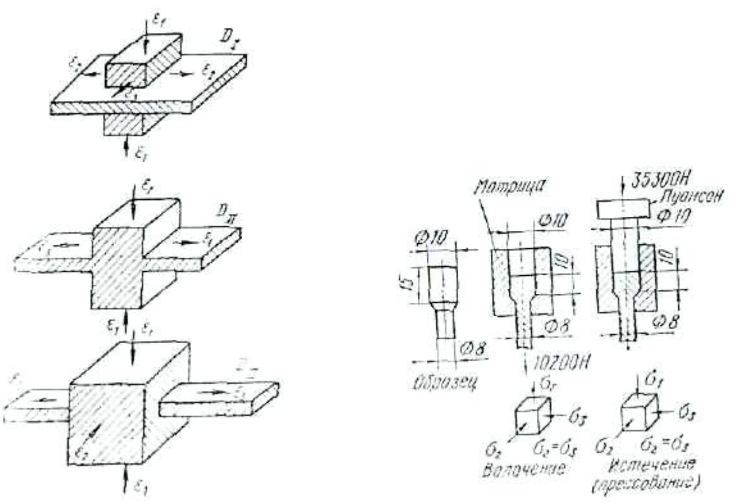

Рисунок 1.6 – Можливі схеми деформації і вплив напруженого стану на опір деформації (по С. І. Губкіну)

Прикладом використання схеми D_I може служити прокатка вузької штаби, прокатка ж широкої штаби проходить за схемою D_{II}. Характерним прикладом використання схеми D_{III} є протягання металу через вічко.

Пояснимо вплив різних схем напруженого стану при одній і той самій схемі деформації D_{III} дослідженням, проведеним С. І. Губкіним. Мідний зразок, показаний на рис. 1.6, закладали в матрицю і при розтяжному зусиллі 10 200 Н піддавали волочінню. Потім здійснювали пресування, збільшивши зусилля деформування, якщо це необхідно до 35300 Н. Безумовно, механічні властивості зразка при першому і другому навантаженнях не змінювалися, отже, опір деформації залежить від схеми напруженого стану.

Опір деформації залежить також від температури і швидкості деформації (рис. 1.4).

Для початку пластичної деформації зсувові напруги повинні досягти деякої величини, тому пластична деформація може відбуватися тільки в пружно деформованому тілі.

Теорія граничного стану встановлює залежність між границею текучості і напругами в металі при його пластичній деформації.

Існують чотири теорії граничного стану. Через те, що теорії найбільших нормальних напружень і найбільших деформацій застаріли, розглянемо лише третю і четверту теорії.

Відповідно до третьої теорії граничного стану, пластична деформація настає, коли різниця двох головних нормальних напружень досягає $\sigma_т$ деформованого металу, тобто виконується умова пластичності: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_т$. Ця теорія не враховує впливу середньої головної нормальної напруги σ_2. Четверта, енергетична, теорія граничного стану розроблена Губером, Мізесом і Генкі.

Відповідно до цієї теорії, пластична деформація в тілі настає, коли потенційна енергія пружної деформації, спрямована на зміну форми тіла, а не об’єму, досягає визначеного значення.

Потенційна енергія пружної деформації: $A = A_0 + A_ф$ (A_0 – потенційна енергія, яку необхідно накопичити в матеріалі для зміни його об’єму; $A_ф$ – потенційна енергія, яку необхідно накопичити в матеріалі для зміни форми тіла).

При об'ємній схемі деформування металу пружна деформація йде по трьом напрямкам, і повна потенційна енергія виражається рівнянням:

$$A = (\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3)/2$$

Зважаючи на те, що відносні деформації за законом Гука дорівнюють:

$\varepsilon_1 = [\sigma_1 - \mu\cdot(\sigma_2 + \sigma_3)]/E$; $\varepsilon_2 = [\sigma_2 - \mu\cdot(\sigma_1 + \sigma_3)]/E$; $\varepsilon_3 = [\sigma_3 - \mu\cdot(\sigma_2 + \sigma_1)]/E$, то повна потенційна енергія дорівнює:

$$A = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu\cdot(\sigma_1\cdot\sigma_2 + \sigma_2\cdot\sigma_3 + \sigma_1\cdot\sigma_3)]/(2E).$$

Коефіцієнт Пуассона для усіх відомих матеріалів: $\mu = (\Delta b/b)/(\Delta l/l) \leq 0,5$.

Збільшення об’єму тіла при пружній деформації дорівнює сумі деформацій у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, тобто

$$\Delta V/V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1 - 2\mu\cdot((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/E.$$

Потенційна енергія зміни об’єму дорівнює половині добутку збільшення об’єму на середню напругу, тобто

$$A_0 = 0{,}5(\Delta V/V)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{3)}/3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{3)}^2 (1 - 2\mu)/(6E).$$

Користуючись розглянутими рівняннями, знаходимо питому потенційну енергію, спрямовану на зміну форми тіла:

$$A_ф = A - A_0 = [(\sigma_1 - \sigma_{2)}^2 + (\sigma_2 - \sigma_{3)}^2 + (\sigma_3 - \sigma_{1)}^2] (1 + \mu)/(6E).$$

На підставі численних досліджень встановлено, що питома потенційна енергія зміни форми при пластичній деформації є величиною постійною, що не залежить від схеми напруженого стану при деформації, тобто $A_ф = Aф._{лін}$.

Таким чином, при лінійній схемі деформації, коли $\sigma_2 = 0$ і $\sigma_3 = 0$, рівняння набуде вигляду: $A_{ф.\ лін} = 2\sigma_т^2(1 + \mu)/(6E)$. І, отже, рівняння пластичності: $(\sigma_1 - \sigma_{2)}^2 + (\sigma_2 - \sigma_{3)}^2 + (\sigma_3 - \sigma_{1)}^2 = 2\sigma_т^2 = const$.

З формули зрозуміло, що сума квадратів різниць головних нормальних напружень при схемі об'ємної деформації (як і при будь-якій іншій схемі деформації) є величина постійна, що дорівнює подвоєному квадрату границі текучості матеріалу за даних умов деформації.

Порівняємо тепер третю і четверту теорії граничного стану. Для цього розглянемо рівняння пластичності для випадків $\sigma_2 = \sigma_3$ $\sigma_2 = \sigma_{1.}$ В обох випадках одержимо, що $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_т$, тобто в цих випадках третя і четверта теорії дають однаковий результат. Для випадку ж, коли $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_{3)}/2$, рівняння пластичності набуде вигляду: $\sigma_1 - \sigma_3 = (2/\sqrt{3})\sigma_т = 1{,}15\sigma_{т.}$

Таким чином, середня головна нормальна напруга впливає на граничний стан (не більше ніж на 15 %) і третя теорія граничного стану є частним випадком четвертої теорії при $\sigma_2 = \sigma_3$ і $\sigma_2 = \sigma_{1.}$

Тому енергетичну теорію пластичності можна виразити більш простим рівнянням $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_т$.

Коефіцієнт β у залежності від значення σ_2 змінюється від 1 до 1,15.

Рівняння пластичності має дуже велике значення при визначенні зусиль, які вимагаються в різних випадках обробки металів тиском, тому що усі форми для визначення зусиль виводяться з використанням рівняння пластичності.