

УДК 621.01.541

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПАСПОРТ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ЗАГОТОВОК

Олександр Володимирович Грушко

Тетяна Ігорівна Молодецька

Досліджено механічні властивості титанових сплавів VT1-0, VT6 у вигляді кривих течії, діаграм пластичності при плоскому та об'ємному напруженому стані, побудовані градууювальні графіки твердість-напруження-деформація.

Mechanical properties of titanium alloys VT1-0, VT6 as flow curves, charts, plasticity, with a flat and volumetric stress state, based calibration diagram hardness-stress deformation.

Исследованы механические свойства титановых сплавов VT1-0, VT6 в виде кривых течения, диаграмм пластичности при плоском и объемном напряженном состоянии, построенные градуировочные графики твердость-напряжение-деформация.

Ключові слова: крива течії, діаграма пластичності, градууювальні графіки твердість-напруження-деформація.

Key words: flow curves, plasticity chart, calibration diagram hardness-stress deformation.

Ключевые слова: кривая течения, диаграмма пластичности, градуировочные графики твердость-напряжение-деформация.

При дослідженнях та технологічних розрахунків процесів пластичного деформування важливе місце посідають відомості про фізико-механічні властивості матеріалу, що деформується. Звичайно, інтерес

представляють лише окремі технологічні функції – крива течії, діаграма пластичності, діаграма стійкості, градувальні графіки твердість-напруження-деформація тощо [1,2,3]. Криві течії використовуються для розрахунків напружено-деформованого стану, силових характеристик процесів обробки металів тиском (ОМТ); діаграми пластичності знаходять широке застосування для оцінювання граничних деформацій за ознакою руйнування матеріалу; діаграми стійкості – для оцінювання граничних деформацій листових матеріалів за ознакою втрати стійкості; тарувальні графіки в методі твердості для експериментальних досліджень напружено-деформованого стану. Таким чином, сукупність зазначених функцій складає технологічний паспорт матеріалу. Для процесів об'ємного деформування, зокрема поверхневого пластичного деформування, втрати стійкості не відбувається, тому дана функція досліджуватись не буде. На сьогоднішній день представляє великий інтерес особливості механіки поверхневого зміцнення циліндричних та сферичних заготовок, що виготовляються з титану та його сплавів, зокрема титану VT1-0 та титану VT6 [4]. Відмітимо, що в результаті інтенсивного пластичного деформування структура VT1-0 може бути подрібнена до величин, що складають порядки нанометрів, що призводить до набуття матеріалом унікальних властивостей. Технологічна обробка деталей з вказаних матеріалів дозволяє більш ефективно їхнє використання в таких галузях, як медицина в якості інплантантів, літакобудування, космічна промисловість тощо.

Метою роботи є побудова кривих течії, діаграм пластичності та градувальних графіків твердість-напруження-деформація титану VT1-0 та титану VT6.

### Криві течії

Під час розрахунків процесів деформування металів користуються кривими, що характеризують залежність істинних напружень від

деформацій (інтенсивності напружень  $\sigma_i$  та інтенсивності логарифмічних деформацій  $e_i$ )  $\sigma_i = f(e_i)$ . Для більшості процесів ОМТ в холодному стані при деформаціях, суттєво перевищуючих границю текучості, крива течії може бути апроксимована степеневою функцією і вигляді [6]

$$\sigma_i = Ae_i^n, \quad (1)$$

або

$$\sigma_\varepsilon = A(e_u + e_0)^n \quad (2)$$

де  $A$  та  $n$  – емпіричні коефіцієнти – модуль та показник зміцнення. Фізичний зміст величини  $A$  відповідає напруженню при одиничній деформації, а  $n$  дорівнює логарифмічній деформації початку шийкоутворення при розтягу зразка.

Будують такі криві за допомогою випробувань стандартних або спеціальних зразків матеріалу в умовах розтягу, стиску, кручення чи інших експериментів. Так в даній роботі проводився експеримент, в якому досліджували зразки титанових сплавів ВТ1-0 та ВТ6 в умовах стиску. Таким чином, із прутків досліджуваних матеріалів виготовляли стандартні циліндричні зразки на стиск діаметром  $D_0=10$  мм і висотою  $H_0=15$  мм у кількості 10 шт. із кожного матеріалу. Зразки осаджували до різних ступенів деформації аж до руйнації в обоймі, яка виключає перекося на гідравлічному пресі ПММ-125. Стиск зразків проводився з використанням свинцевої фольги і змащенням торців пастою із колоїдного графіту та гліцерину. Після кожного ступеню навантаження мастило і свинцеві прокладки замінялися. Тертя на торцях зразка було несуттєвим, що підтверджує відсутність бочкоутворення на бічній поверхні. Граничну деформацію при осаджуванні визначали за формулою

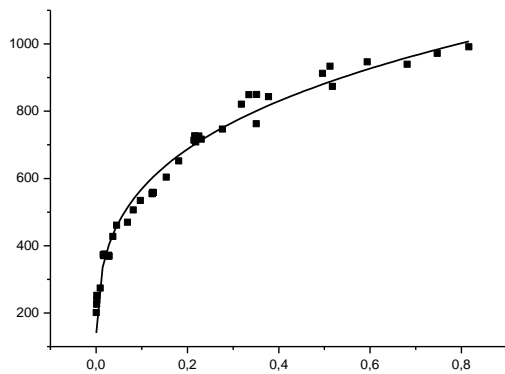
$$e_i = \ln \frac{H_0}{H}, \quad (3)$$

де  $H_0$  – висота вихідного зразка;  $H$  – висота зразка після деформування.

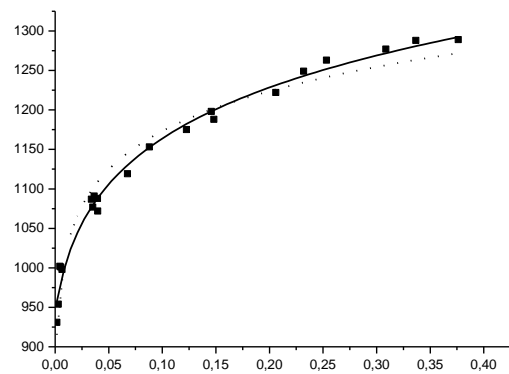
В результаті досліджень побудовані криві течії (рис.1, 2) та показані апроксимації згідно залежностей (1), (2). Останні отримані шляхом статистичної обробки отриманих результатів за допомогою ЕОМ. Таким чином отримані коефіцієнти апроксимації, які зведені в таблицю 1:

Таблиця 1 – Коефіцієнти апроксимації

| №<br>п/п | Матеріал | Коефіцієнти апроксимації |                      |             |                |                |
|----------|----------|--------------------------|----------------------|-------------|----------------|----------------|
|          |          | A, МПа                   | A <sub>1</sub> , МПа | n           | n <sub>1</sub> | e <sub>0</sub> |
| 1        | BT1-0    | 1071±31                  | -                    | 0,267±0,018 | -              | -              |
| 2        | BT6      | 1358±24                  | 1425,39±12           | 0,063±0,007 | 0,102±0,008    | 0,027±0,007    |



а)



б)

Рис.1 – Крива течії титанового сплаву BT1-0 (а) та BT6 (б)

Вісь абсцис - накопичена деформація  $e_u$ ; вісь ординат – інтенсивність напружень  $\sigma_u$

Градувальні графіки твердість-напруження-деформації

Стиснуті до різних ступенів деформацій зразки розрізали по меридіальному перерізі, фіксували в спеціальні обоймі, та вимірювали твердість за Віккерсом при зусиллі на індентор 30 кгс (в середньому 10 точок в різних місцях).

Відмітимо, що титан BT1-0 проявляє достатньо сильну анізотропію – це підтверджує відхилення діагоналей відбитка на торці початкового

зразка біля 5%. Для деформованих зразків картина аналогічна (при більших степенях деформації анізотропія зростає). Однак, середня твердість по кожному зразку відносно стабільна (відхилення складає до 1-2%). Гранична деформація при стиску сягнула 2,1 - при цьому спостерігалось суттєве бочкоутворення. Тому для розрахунку інтенсивності напружень для останньої точки використовували апроксимацію за попередніми точкам кривої течії.

Титан ВТ6 з точки зору твердості проявляє достатньо сильну неоднорідність. На різних зразках (недеформованих) і навіть в межах одного зразка твердість неоднакова – відхилення до 3% і більше. Таку особливість можна пояснити деформаційною анізотропією початкового прутка. Підвищення твердості при збільшені деформацій також незначне, що пов'язано з невеликою змінюваністю та низькими граничними деформаціями. Результати досліджень представлені у вигляді градууювального графіка (рис.4). Деякі точки сильно відхиляються, що може бути пов'язано з відмінностями в початковій твердості зразків та наклепом при механічній обробці.

Градууювальні графіки представлені на рис.3 та 4

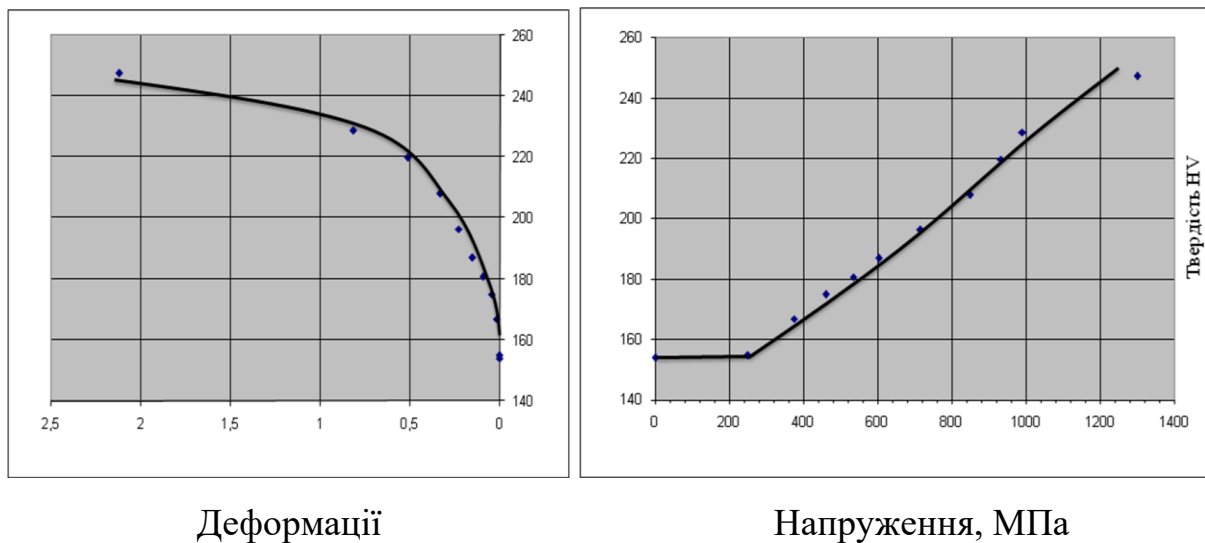


Рис.3 Градууювальний графік зразка ВТ1-0

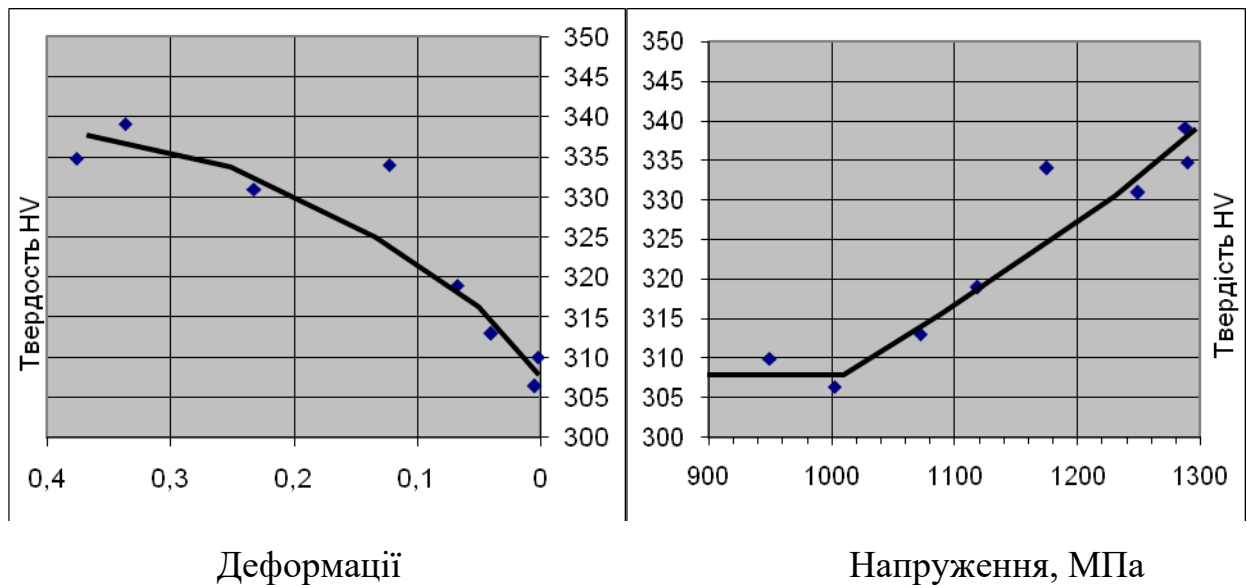


Рис.4 – Градувальний графік зразка ВТ6

#### Діаграми пластичності

Під пластичністю розуміють здатність матеріалу до формозміни без руйнування у вигляді макроскопічного порушення суцільності. Діаграмою пластичності називають залежність пластичності від показника, що характеризує жорсткість схеми напруженого стану. Діаграми пластичності можуть бути побудовані за результатами випробувань стандартних зразків при простих видах деформування з подальшою їх апроксимацією.

Питання апроксимації діаграм пластичності, отриманих у результаті досліджень матеріалів на розтяг, стиск та кручення розглянуті в роботах [1,7].

Вагомий внесок у методику побудови діаграм пластичності (спільний розтяг і кручення, випробування зразків у камері високого тиску й ін.) і їхньої апроксимації внесли Г. Д. Дель [5] і В. А. Огородніков [1,2]. В області зміни показника напруженого стану  $-3 \leq \eta \leq 1$  діаграми пластичності задовільно описується рівнянням, запропонованим Г. Д. Делем [5]:

$$e_p = \frac{e_p(\eta = 0)e_p(\eta = -1)\exp(-\eta)}{e_p(\eta = -1) + \eta[e_p(\eta = -1) - 2,72e_p(\eta = 0)]}$$

де  $e_p(\eta = 0)$  і  $e_p(\eta = -1)$  - пластичність матеріалу відповідно при осьовому стиску зі змащенням і чистим зсувом.

В області зміни показника  $-1 \leq \eta \leq 2$  діаграму можна апроксимувати рівнянням В. О. Огороднікова [1]:

$$e_p(\eta) = e_p(\eta = 0) \exp(-\eta \lambda_i), \quad (4)$$

де  $\lambda_i$  - коефіцієнт чутливості пластичності до схеми напруженого стану;  $\lambda_i$  ( $i=1,2$ ). При значеннях  $\lambda_i = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)}$  діаграма пластичності може бути апроксимована в області зміни показника напруженого стану  $0 \leq \eta \leq 2$ . В області зміни показника напруженого стану  $0 \leq \eta \leq -1$  вводиться в (1) коефіцієнт чутливості пластичності до зміни схеми напруженого стану

$$\lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)}.$$

Слід відмітити, що коефіцієнти  $\lambda_i$  в рівнянні (4) мають фізичний зміст – вони являють собою лінеаризовані криві, тангенс кута нахилу яких до осі  $\eta$  характеризує чутливість пластичності до рівня гідростатичного тиску.

Для проміжних значень, коли відомі дві точки діаграми пластичності в інтервалі  $0 \leq \eta \leq 2$ , але відмінних від  $e_p(\eta = 0)$  і  $e_p(\eta = -1)$ , можливе застосування апроксимуючої функції:

$$e_p(\eta) = e_p(\eta = \eta_1) \exp\left(-\ln \frac{e_p(\eta = \eta_1) \eta - \eta_1}{e_p(\eta = \eta_2) \eta - \eta_2}\right)$$

де  $e_p(\eta = \eta_1)$  і  $e_p(\eta = \eta_2)$  – гранична деформація при показнику напруженого стану, рівного відповідно  $\eta_1$  і  $\eta_2$ ; (при незмінності показника  $\eta$  протягом всього часу деформування є простим).

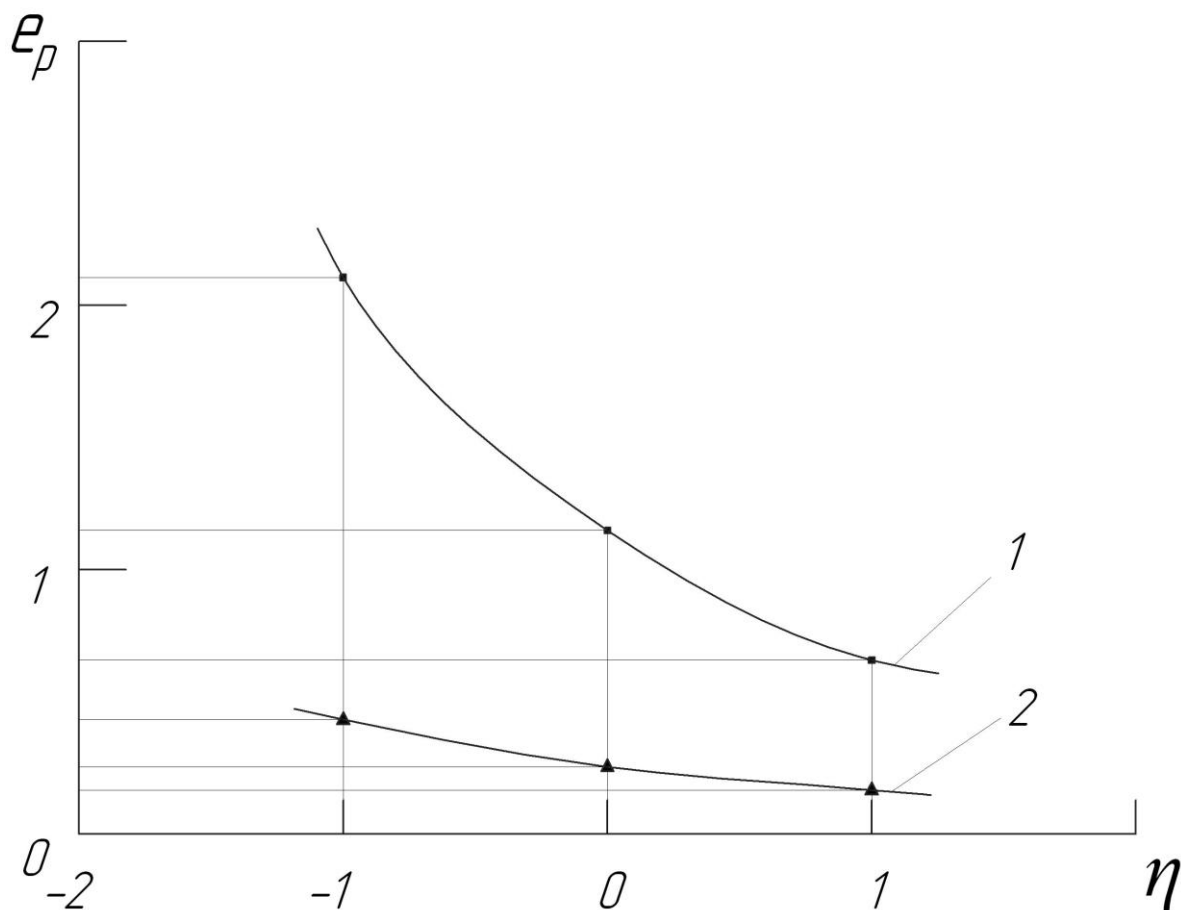


Рис.5 – Діаграма пластичності титанових сплавів: 1 - ВТ1-0, 2 - ВТ6

Після аналізу залежностей  $e_p(\eta)$  отриманих експериментально для титанових сплавів ВТ1-0 і ВТ6 (рис.5) апроксимовані експериментальні поверхні граничних деформацій залежністю [7]

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = e_p(0,0) \exp(\lambda_2 \mu_\sigma - \lambda_1 \eta),$$

В результаті обробки експериментальних залежностей досліджуваних матеріалів отримані наступні значення коефіцієнтів апроксимації для зразка ВТ1-0:  $e_p(0,0) = 1,15, \lambda_1 = 0,34, \lambda_2 = 0,27$ ; для зразка ВТ6:  $e_p(0,0) = 0,272, \lambda_1 = 0,149, \lambda_2 = 0,168$ . В результаті отримані об'ємні діаграми пластичності (рис.6,7) для матеріалів ВТ1-0 та ВТ6.



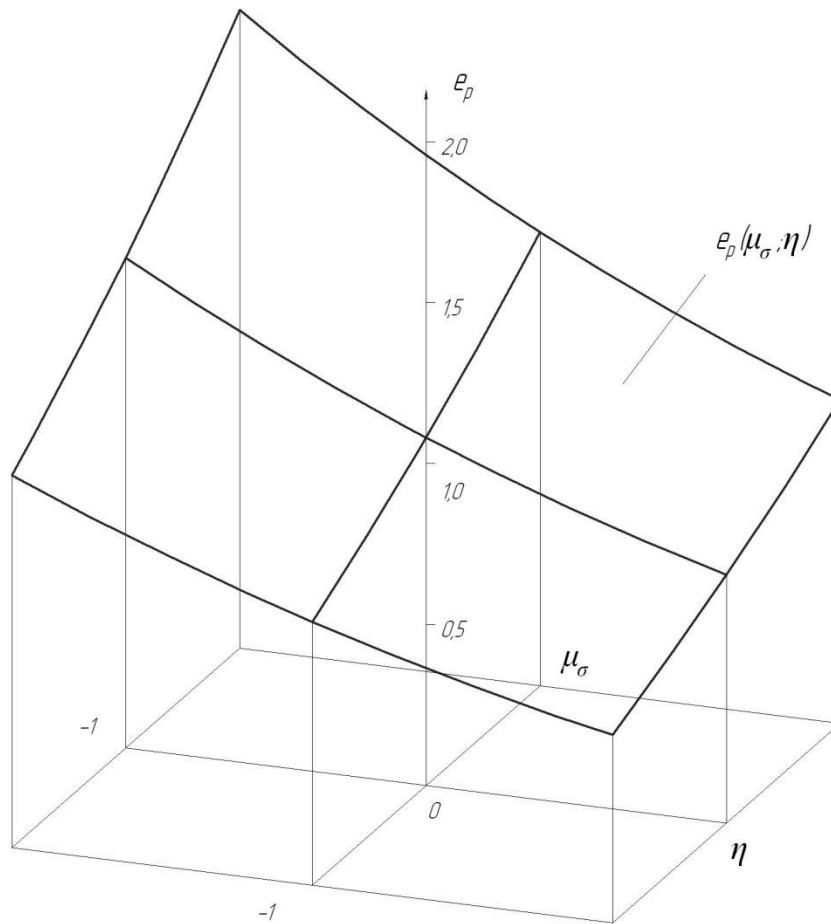


Рис. 6 – Об’ємна діаграма пластичності матеріалу BT1-0

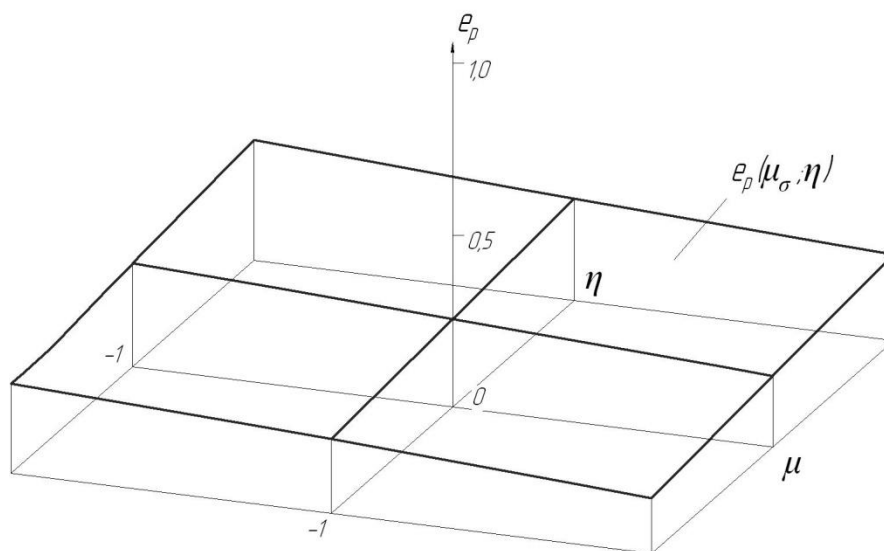


Рис. 7 – Об’ємна діаграма пластичності BT6

## Висновки:

Криві течії титану з великою ступеню кореляції апроксимуються степеневими функціями. Обидва матеріали досить інтенсивно зміцнюються при пластичному деформуванні.

Залежність твердості зміцненого титану від інтенсивності напружень має залежність, близьку до лінійної. Статистичний розкид даних для титану ВТ6 досить суттєвий, що пов'язано зі структурними особливостями матеріалу та умовами експерименту.

Титан ВТ1-0 має велику пластичність в області всебічного стиску, що дає можливість проводити його технологічну обробку в холодному стані до великих значень накопичених деформацій. Титан ВТ6 виявляє малу чутливість пластичності до зміни схеми напруженого стану, тому при його технологічній обробці необхідно уникати великих локальних деформацій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 175 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
6. Грушко А.В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А.В. Грушко, В.А. Огородников, В.И. Музычук // Кузнечно-штамповочное производство «Обработка металлов давлением». – 2007. - №8. – С.16-20. – ISSN 0234-8241.
7. Сивак И.О. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И.О.Сивак, Е.И. Коцюбивская // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: тематичн. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА. – 2007. – С. 73-76.