

# Експериментально-аналітичний метод побудови в'язкопластичної моделі матеріалу для титанового сплаву ВТ6 на основі випробувань на згин

В. А. Тітов • Т. Р. Гараненко • А. В. Тітов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 02 September 2019 / Accepted: 24 November 2019

**Анотація.** Розроблено метод експериментально-аналітичної побудови кривих деформування на підставі випробувань на згин. В основу методу покладено вирішення системи рівнянь рівноваги моментів внутрішніх та зовнішніх сил при чистому згині заготовок. Рівняння для знаходження лінійних коефіцієнтів апроксимації кривої деформування, що описують в'язкопластичну модель матеріалу, отримані теоретично на основі кінематичної моделі чистого згину, яка пов'язує геометричні параметри заготовки з компонентами тензора швидкостей деформацій матеріалу заготовки та часом її деформування. На основі експериментально визначених залежностей зміни внутрішнього радіусу заготовки від часу під дією постійного моменту сил з використанням системи рівнянь отримана залежність інтенсивності напружень від швидкостей деформацій для титанового сплаву ВТ6 при температурі деформування 900 °С. Порівнянням результатів розрахунку з відомими даними, що використовуються в програмному комплексі Deform 3D для титанового сплаву Ti-6Al-4V (закордонний аналог ВТ6 за хімічним складом) показано, що максимальна похибка не перевищує 16 %. Отримані в'язкопластичні моделі матеріалу можуть бути використані для розрахунку операцій формоутворення в обробці металів тиском.

**Ключові слова:** експериментально-аналітичний метод, в'язкопластична модель матеріалу, випробування на згин, титановий сплав ВТ6, інтенсивність напружень, інтенсивність деформацій, швидкості деформацій, кінематична модель згину, ізотермічні умови деформування, гаряча пластична деформація.

## Вступ

Комп'ютерне моделювання знаходить все більш широке використання при проектуванні процесів обробки металів тиском (ОМТ). На сьогодні розробникам на ринку інтелектуальної власності пропонують велику кількість сертифікованих комп'ютерних пакетів прикладних програм (ППП), які добре зарекомендували себе як в Україні, так і закордоном для розрахунку процесів пластичної деформації металів. В першу чергу це Deform, Qform, Abaqus, SuperForge та інші.

Одною з проблем, що виникають при використанні ППП є достовірність результатів розрахунку процесів ОМТ, що пов'язана з точністю опису моделей матеріалів. Більшість ППП мають вбудовану (або постачається окремо) базу даних фізичних та реологічних властивостей промислових сплавів. Такі дані, як правило, не враховують особливості реологічної поведінки промислових сплавів в залежності від структури матеріалу, температурних умов деформування, швидкості деформацій, які визначають особливості функції зв'язку інтенсивності напружень від деформаційного та швидкісного зміцнення (кривої деформування).

Температура пластичного формоутворення визначає механізми деформацій металевих матеріалів на структурному рівні. Це визначає реологічну поведінку матеріалу на феноменологічному рівні.

В залежності від діапазону температур нагрівання заготовка проявляє різні властивості [1], які визначаються двома конкуруючими процесами – деформаційне зміцнення та опір течії металу при в'язкопластичному стані. Відомо, що з підвищенням температури нагрівання зменшується величина впливу деформаційного зміцнення за рахунок дислокаційного ковзання в зернах металу. Активується велика кількість систем ковзання, вступають в дію дифузійні процеси, процеси міжзеренного ковзання та інші. Метал деформується як в'язка рідина, а ефективність його деформування залежить від структурних компонент (в основному від величини зерен), а також від швидкості деформування. В теоретичному плані поведінку металу зручно і ефективно можна описувати в рамках теорії пластичної течії. В цьому випадку точність опису процесів деформування визначається правильністю вибору моделі матеріалу, яка визначає його реологічну поведінку.

✉ В. А. Тітов

vat.kpi@gmail.com

✉ Т. Р. Гараненко

tetiana.garanenko@gmail.com

✉ А. В. Тітов

avt.kpi@gmail.com

В табл. 1 представлені особливості реологічного стану металевих матеріалів від температури обробки.

Таблиця 1

**Залежність реологічного стану металевих матеріалів від температури обробки**

Інтервал температур деформування	Типова феноменологічна модель матеріалу	Показник деформаційного зміцнення, $n$	Показник швидкісного зміцнення, $m$	Реологічні властивості металу
$< 0,3T_{nl}$	$\sigma_i = ke^n$	$> 0,3$	$< 0,01$	Метал з деформаційним зміцненням
$(0,3 \dots 0,5) T_{nl}$	$\sigma_i = \sigma_s + ke_i^n$	$0,2 \dots 0,3$	$0,01 \dots 0,1$	
$(0,5 \dots 0,7) T_{nl}$	$\sigma_i = k \cdot e_i^n \cdot \varepsilon_i^m$ , $\sigma_i = k_1 e_i^n \varepsilon_i^m$	$0,1 \dots 0,2$	$0,1 \dots 0,2$	Деформування металу супроводжується деформаційним та швидкісним зміцненням
$> 0,7T_{nl}$		$< 0,1$	$> 0,2$	В'язкопластична поведінка металу з швидкісним зміцненням
$T_{\min} \leq T \leq T_{\text{м.к.}}$	$\sigma_i = k\varepsilon_i^m$	–	$0,5 \leq m \leq 1$	Метал деформується як в'язка рідина

В табл. 1 введені наступні позначення:  $T_{nl}$  – температура плавлення металу,  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;  $\sigma_{ST}$  – умовна границя текучості при даній температурі;  $e_i$  та  $\varepsilon_i$  – інтенсивності, відповідно деформацій та швидкостей деформацій;  $k_T$  – константа, що залежить від температури деформацій;  $n$  та  $m$  – константи, коефіцієнти деформаційного та швидкісного зміцнення відповідно.

Функції зв'язку, які представлені в табл. 1 та визначають феноменологічні моделі матеріалів, досить повно характеризують реологічні властивості матеріалів, але можуть мати інший, як правило, більш складний вигляд [2–17].

У відповідності до діапазонів температур проведення процесів деформування, при холодній пластичній деформації ( $T \leq 0,3T_{nl}$ , див. табл. 1) на феноменологічному рівні спостерігається деформаційне зміцнення, яке характеризується величиною коефіцієнту деформаційного зміцнення в межах  $0,3 \leq n \leq 1,0$  та практично відсутністю швидкісного зміцнення ( $m \rightarrow 0$ ).

При гарячій пластичній деформації, практично, повністю відсутнє деформаційне зміцнення металу ( $n \rightarrow 0$ ). В деяких випадках спостерігається також зменшення металу внаслідок динамічної перекристалізації, в результаті чого виникає створення нових зерен, які вільні від накопичення дислокацій. При цьому швидкісне зміцнення переважає ( $m \geq 0,2$ ) за рахунок інтенсивного проходження дифузійних процесів, а також рухом лінійних та об'ємних дефектів кристалічної решітки – краєвих і гвинтових дислокацій в об'ємі та по границям зерен під дією лінійних напружень. При цьому швидкості переміщення точкових, лінійних та об'ємних дефектів кристалічної решітки залежать від величини напружень, що діють. Таким чином деформаційне формування обумовлене в'язкою деформацією. Матеріали проявляють великі пластичні деформації.

Таблиця 2

**Реологічний стан металевих виробів в залежності від величини вихідного зерна [1]**

Розмір зерна, мм	Тип структури металу	Інтервал температур деформування	Діапазон швидкостей деформацій, $\text{с}^{-1}$	Реологічний стан
$> 10^0$	Крупнозернистий	$(0,5 \dots 0,9) T_{nl}$	$10^{-1} \dots 10^1$	Пластичний
$10^{-1} \dots 10^0$	Середньозернистий	$(0,5 \dots 0,9) T_{nl}$	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	В'язкопластичний
$10^{-2} \dots 10^{-1}$	Дрібнозернистий	$(0,5 \dots 0,8) T_{nl}$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	В'язкопластичний
$10^{-3} \dots 10^{-2}$	Ультрамлікозернистий	$(0,5 \dots 0,8) T_{nl}$	$10^{-6} \dots 10^{-3}$	Надпластичний
$10^{-4} \dots 10^{-3}$	Субмікрозернистий	$(0,5 \dots 0,9) T_{nl}$	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	Надпластичний
$10^{-5} \dots 10^{-4}$	Нанозернистий	$(0,9 \dots 0,99) T_{nl}$	$10^{-1} \dots 10^2$	Твердо-рідкий

Необхідність в досягненні великих пластичних деформацій при реалізації процесів ОМТ призводить до використання ізотермічних процесів в умовах гарячих пластичних деформацій. При цьому в залежності від вихідної структури матеріалу та величини швидкості деформацій розглядають [1] різні типи реологічного стану (табл. 2).

Вплив швидкісного та структурного факторів необхідно враховувати для побудови феноменологічної моделі матеріалів у вигляді функції зв'язку між опором деформуванню (інтенсивністю напружень) та інтенсивністю деформаційних процесів (деформацій та їх швидкостей).

Визначення констант функцій зв'язку, як правило, здійснюють експериментально [18–19].

Класичні методи побудови цих функцій являються трудоміськими. Внаслідок цього авторами запропонований експериментально-аналітичний метод побудови в'язкопластичної моделі матеріалу на основі випробувань на згин.

В роботі [20] розглянуто метод експериментально-аналітичної побудови кривих деформування для моделювання матеріалів при випробуваннях на згин, який дозволяє ефективно моделювати властивості деформування матеріалів в рамках моделі пружньопластичного суцільного середовища в умовах холодної пластичної деформації. В цих моделях опір деформуванню ( $\sigma$ ) матеріалу являється функцією ступеня деформації ( $e$ ).

При формоутворенні деталей в умовах гарячої пластичної деформації опір деформуванню металів залежить також від фактору часу. В цьому випадку використовують, як правило, залежність між напруженнями, деформаціями та швидкістю деформації ( $\dot{\epsilon}$ ) [2, 20–22].

На основі аналізу публікацій сформульована мета роботи.

### Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробка експериментально-аналітичного методу визначення в'язкопластичної моделі матеріалу для ізотермічних умов деформування на основі випробувань на згин.

При цьому вирішені наступні основні задачі:

1. На основі виконаного аналітичного огляду наукових публікацій по визначенню моделі деформування матеріалу в ізотермічних умовах розроблена загальна структура експериментально-аналітичного методу.
2. Теоретичне обґрунтування та отримання системи лінійних рівнянь для визначення сталих констант (коефіцієнтів) з використанням експериментальних результатів.
3. Постановка експерименту та визначення даних для вирішення системи рівнянь.
4. Вирішення системи рівнянь та отримання моделі в'язкопластичного матеріалу.
5. Аналіз коректності отриманої моделі на основі порівняння з відомими даними.

### Викладення основного матеріалу дослідження

#### 1. Загальна структура експериментально-аналітичного методу

Алгоритм побудови в'язкопластичної моделі металів для ізотермічних умов при випробуваннях на згин складається з наступних етапів:

1) Вибір моделі метала в вигляді функції з невідомими лінійними коефіцієнтами.

В роботі для побудови в'язкопластичної моделі матеріалу була прийнята аналітична залежність, яка виражена ступеневою функцією виду  $\sigma = F(e, \dot{\epsilon})$ . Для апроксимації кривої деформування використовуємо ірраціональний поліном восьмого ступеня в виді:

$$\sigma_i = ae_i + be_i^{1/2} + ce_i^{1/4} + de_i^{1/8} + A\dot{\epsilon}_i + B\dot{\epsilon}_i^{1/2} + C\dot{\epsilon}_i^{1/4} + D\dot{\epsilon}_i^{1/8} \quad (1)$$

де  $\dot{\epsilon}_i$  – інтенсивність швидкостей деформування,  $e_i$  – інтенсивність деформації.

2) Теоретичне отримання системи лінійних рівнянь для визначення коефіцієнтів з використанням експериментальних результатів.

Визначальні рівняння в роботі отримані для моменту внутрішніх сил при згині відносно центру кривизни [19, 20].

Враховуючи незалежність величини моменту відносно координати, що паралельна твірній заготовки, а також кутової координати, визначальні рівняння записані для питомого моменту, що залежить тільки від радіальної координати:

$$M = \int_{R_B}^{R_H} \sigma_i r dr \quad (2)$$

3) Експериментальне визначення залежності радіусу згину заготовки, що деформується, від величини моменту навантаження при чистому згині, часу навантаження і температури деформування;

4) Вирішення системи рівнянь для визначення невідомих лінійних коефіцієнтів.

Для отримання визначальних рівнянь необхідно установити зв'язок між кінематичними параметрами заготовки при чистому згині в залежності від часу деформування.

## 2. Кінематична модель чистого згину широкої заготовки

Для опису величини деформації та швидкості деформації використана кінематична модель чистого згину широкої заготовки з листового металу, яка враховує параметр часу ( $t$ ) [20].

Аналіз чистого пластичного згину виконується в циліндричній системі координат. Вважалось, що деформований стан плоский, а напружений стан об'ємний.

Поле швидкостей при чистому циліндричному згині приймає наступний вид:

$$\begin{aligned} V_r &= -\frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ r + \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r} \right]; \\ V_\varphi &= 2 \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} r\varphi; \\ V_z &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $R_{H_0}, R_{B_0}, \varphi$  – відповідно значення внутрішнього і зовнішнього радіусів вигнутої заготовки та кут згину в початковий момент часу;

$V_0$  – швидкість зміни радіусів  $R_H, R_B$  при згинанні.

Величини поточних радіусів поверхні заготовки визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} R_B &= R_{B_0} - V_0t, \\ R_H &= R_{H_0} - V_0t. \end{aligned} \quad (4)$$

По відомому полю швидкостей визначено компоненти тензора швидкостей деформації:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\varepsilon_{\varphi\varphi} = -\frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r^2} \right]; \\ \varepsilon_{zz} &= 0; \varepsilon_{r\varphi} = 0; \varepsilon_{\varphi z} = 0; \varepsilon_{zr} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Інтенсивність швидкостей деформації

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi})^2 + (\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + \frac{2}{3}(\varepsilon_{r\varphi}^2 + \varepsilon_{\varphi z}^2 + \varepsilon_{zr}^2)} \quad (6)$$

Інтенсивність швидкостей деформацій (6) з врахуванням (5) має вид:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} |\varepsilon_{\varphi\varphi}| \quad (7)$$

## 3. Визначення спрощеної моделі в'язкопластичного матеріалу

Для практичного використання система рівнянь [21] занадто трудомістка. Для умов ізотермічного деформування модель в'язкопластичного матеріалу можна спростити.

Приймаємо припущення, що при ізотермічному гарячому деформуванні величина опору деформаціям  $\sigma_i$  не залежить від ступеня деформації при постійній швидкості деформацій. Властивості матеріалу близькі до ідеального пластичного матеріалу. Тоді вираз (1) набуває вигляду:

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i + B \cdot \varepsilon_i^{1/2} + C \cdot \varepsilon_i^{1/4} + D \cdot \varepsilon_i^{1/8}. \quad (8)$$

Інтенсивність напруження  $\sigma_i$  має зв'язок з інтенсивністю швидкостей деформації функціонально та описується кривою деформування – модель матеріалу.

Враховуючи рівняння (6), (7), апроксимуюча крива деформування (8) має вид:

$$\begin{aligned}
\sigma_i = & A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] + \\
& + B \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/2} + \\
& + C \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/4} + \\
& + D \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/8}
\end{aligned} \tag{9}$$

Питомий момент внутрішніх сил відносно центру кривизни з врахуванням рівняння (9), має вид:

$$\begin{aligned}
M = 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma \cdot (r - \rho) dr &= 2 \int_{\rho}^{R_H} (A \cdot \varepsilon + B \cdot \varepsilon^{1/2} + C \cdot \varepsilon^{1/4} + D \cdot \varepsilon^{1/8}) \cdot (r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}) dr = \\
&= 2 \left( \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \cdot r dr - \right. \\
&- \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&- \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&- \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&- \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr
\end{aligned} \tag{10}$$

Питомий момент складається з 4 складових:

$$\begin{aligned}
M = 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma \cdot (r - \rho) dr &= 2 \int_{\rho}^{R_H} (A \cdot \varepsilon + B \cdot \varepsilon^{1/2} + C \cdot \varepsilon^{1/4} + D \cdot \varepsilon^{1/8}) \cdot (r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}) dr = \\
&= 2 \cdot (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)
\end{aligned} \tag{11}$$

де

$$\rho = \sqrt{R_H \cdot R_B} = \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} - \text{радіус нейтральної поверхні};$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right| - \text{інтенсивність швидкостей деформацій.}$$

Для знаходження невідомих констант  $A, B, C, D$  необхідно вирішити систему з 4 рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} M &= 2 \cdot (M_{11} + M_{21} + M_{31} + M_{41}) \\ \dots \\ M &= 2 \cdot (M_{14} + M_{24} + M_{34} + M_{44}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

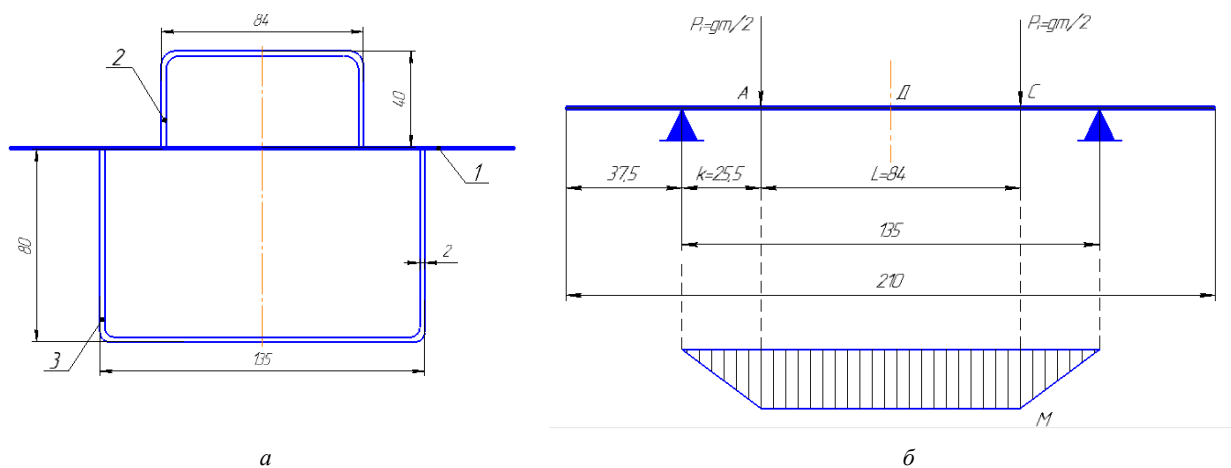
Розрахункові величини  $V_0$ ,  $R_H$ ,  $R_B$  для моменту в рівнянні (10) визначаються експериментально.

#### 4. Експериментальне визначення розрахункових величин

Для визначення розрахункових величин в рівнянні (9) було проведено деформування заготовки в умовах чистого згину в ізотермічних умовах. При дослідженні чистого згину основною задачею являлось визначення залежності внутрішнього та зовнішнього радіусу прогину, від моменту внутрішніх сил для кожного відрізка часу. Це дає можливість скласти та вирішити систему з чотирьох лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів апроксимації.

Для випробувань на чистий згин були використані зразки прямокутної форми 210×60 мм з листового титанового сплаву ВТ6 товщиною 1мм та 1,5мм, який має розмір вихідного зерна 7–12мкм.

Зразок встановлювали на дві опори та приклали навантаження (рис. 1), яке зосереджене на однакових відстанях від опор двома рівними силами, які створюють в середині частині заготовки (довжиною  $L$ ) чистий згин.



а

б

**Рис. 1.** Навантаження зразка при випробуваннях на згин:

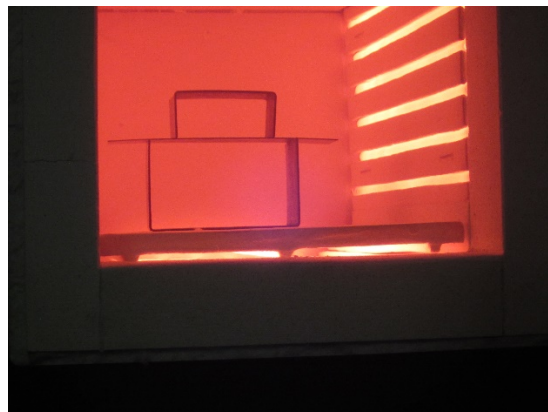
а) схема навантаження: 1 – заготовка, 2 – прижим, 3- нижня опора;

б) епюра моменту сил в робочій частині зразка

Заготовку 1 встановлювали на опорі 3 і прижимом 2 забезпечували навантаження зразка (рис. 1). Ширина опори – 100 мм. Опора та прижим виготовлені з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т. Деформування проводили в нагрівальному устаткуванні – електричній муфельній печі СНОЛ30/1300 при постійній температурі. Через певний проміжок часу фіксувався прогин зразка (рис. 2.).



а



б

**Рис. 2.** Пристрій (а) та його установка в печі (б)

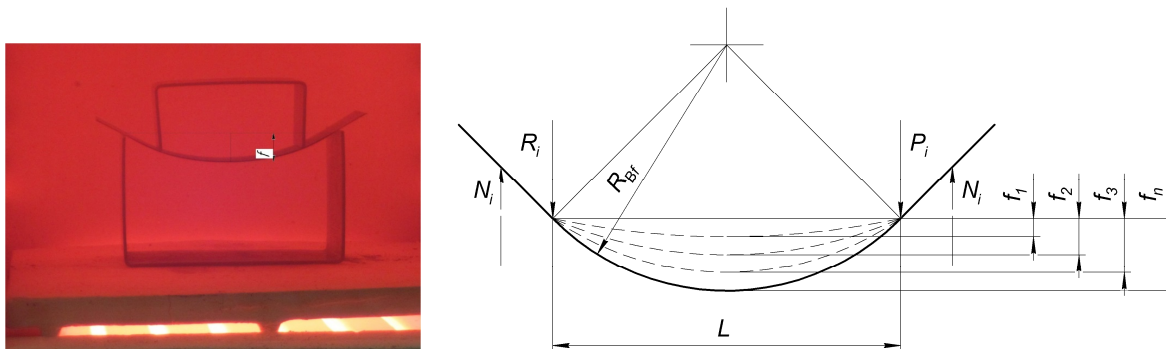


Рис. 3. Схема знаходження прогину

Чистий згин плоских зразків з титанового двофазного сплаву ( $\alpha + \beta$ ) ВТ6 досліджувався під дією постійної в часі сили ваги притискача при температурі гарячого формоутворення  $900\text{ }^\circ\text{C}$ .

Випробування проводились для трьох рівнів навантаження  $P_1 = 2,86\text{ Н}$ ,  $P_2 = 3,3\text{ Н}$ ,  $P_3 = 3,74\text{ Н}$ . при цьому температура для всіх зразків була однакою. Згинаюча сила  $P$  приймалась як сила ваги притискача. Величина згинаючого моменту складала  $M_{з1} = 36,5 \cdot 10^{-3}\text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{з2} = 42 \cdot 10^{-3}\text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{з3} = 47,7 \cdot 10^{-3}\text{ Н}\cdot\text{м}$ .

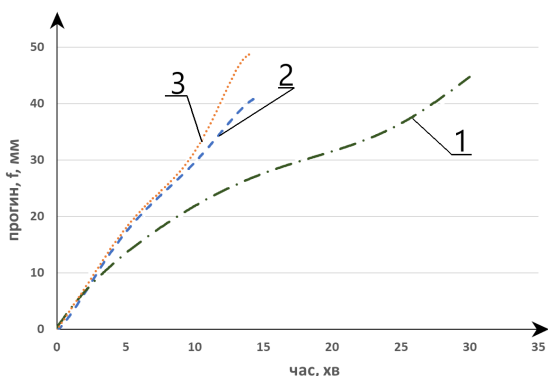


Рис. 4. Залежність прогину від часу для титанового сплаву ВТ6 при температурі  $900\text{ }^\circ\text{C}$  та питомого моменту  $\left[\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}}\right]$ :

$$1 - M_1 = 0,6, 2 - M_2 = 0,7, 3 - M_3 = 0,8$$

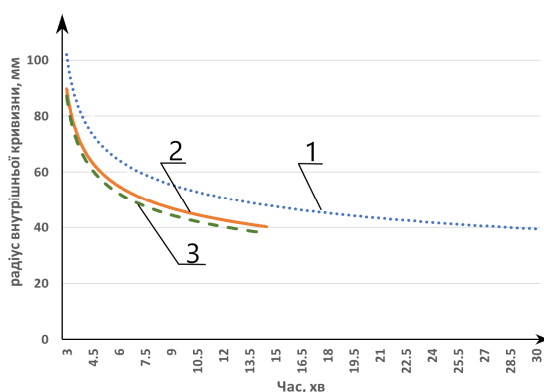


Рис. 5. Залежність внутрішнього радіусу від часу для титанового сплаву ВТ6 при температурі  $900\text{ }^\circ\text{C}$  та питомого моменту  $\left[\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}}\right]$ : 1 -  $M_1 = 0,6$ , 2 -  $M_2 = 0,7$ , 3 -  $M_3 = 0,8$

Момент постійний для всіх перерізів між точками прикладання зусиллям. Для подальших розрахунків знайдена величина питомого моменту. Для цього величину згинального моменту було поділено на ширину заготовки (60мм) та отримано

$$M_1 = 0,6 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}}, M_2 = 0,7 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}}, M_3 = 0,8 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}}$$

Після встановлення установки з зразком в піч, фіксували прогин через кожні 30 секунд.

На основі експериментальних даних побудовані залежності прогину  $f$  від часу, які показані на рис. 4.

На основі отриманих залежностей визначався радіус внутрішньої кривизни із геометричних параметрів (рис. 3)

$$R_{Bt} = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}{2f} = \frac{1764 + f^2}{2f},$$

де  $f$  - величина прогину.

Радіус зовнішньої кривизни знаходили з рівняння  $R_{nt} = R_{gt} + \delta$ , де  $\delta$  - товщина матеріалу, величина  $\delta = 1,5\text{ мм}$  постійна,  $R_{gt}$  - радіус внутрішньої кривизни, величина якого залежить від часу.

На основі отриманих даних побудовано графік залежності радіусу кривизни внутрішньої поверхні заготовки від часу (рис. 5).

Отримані залежності дозволили визначити швидкість зміни внутрішнього радіусу кривизни заготовки за формулою:

$$V_0 = \frac{R_0 - R_{gt}}{t} \quad (13)$$

де  $t$  - проміжок часу, за який фіксували зміну радіусу,  $R_{gt}$  - радіус кривизни внутрішньої поверхні

в даний момент часу,  $R_0 = 200$  мм – початковий радіус кривизни, який приймаємо довільно, в межах інтервалу пружної деформації.

### 5. Побудова моделей в'язкопластичного матеріалу для титанового сплаву ВТ6

Для знаходження невідомих коефіцієнтів  $A, B, C, D$  вирішувалась система, яка складається з чотирьох рівнянь. Для кожного зразка вибирали чотири довільних точки із графіку залежності внутрішнього радіусу. Розв'язавши систему матричним методом отримано коефіцієнти апроксимації  $A, B, C, D$  для кожного зразка. З врахуванням (8) отримано наступні залежності напружень від швидкостей деформацій для зразків:

$$\text{Зразок №1 } (M_1 = 0,6 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}})$$

$$\sigma_i = 8099327607 \cdot \varepsilon - 238930164 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 2834765 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 12553958 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

$$\text{Зразок №2 } (M_2 = 0,7 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}})$$

$$\sigma_i = 6513324400 \cdot \varepsilon - 224058360 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 6252792 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 14589846 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

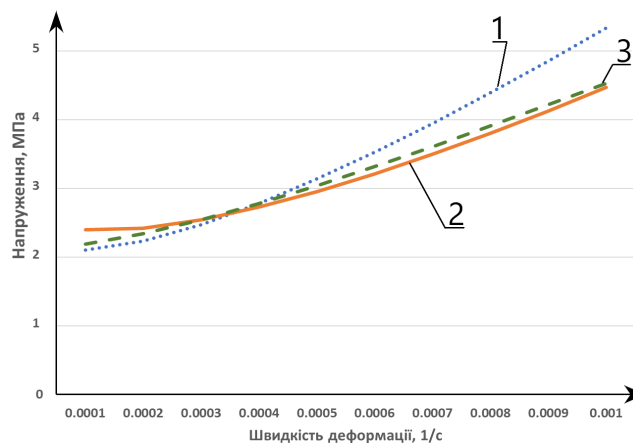
$$\text{Зразок №3 } (M_3 = 0,8 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}})$$

$$\sigma_i = 4539779820 \cdot \varepsilon - 66556918 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 24803428 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 15435251 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

Графічно отримані залежності наведені на рис. 6. Співставлення кривих для різних моментів навантаження показують, що:

– якісно характер поведінки кривих для умов деформування, що розглядали, для сплаву ВТ6 однаковий;

– похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} (\text{с}^{-1})$  не перевищує  $10 \dots 14\%$ .

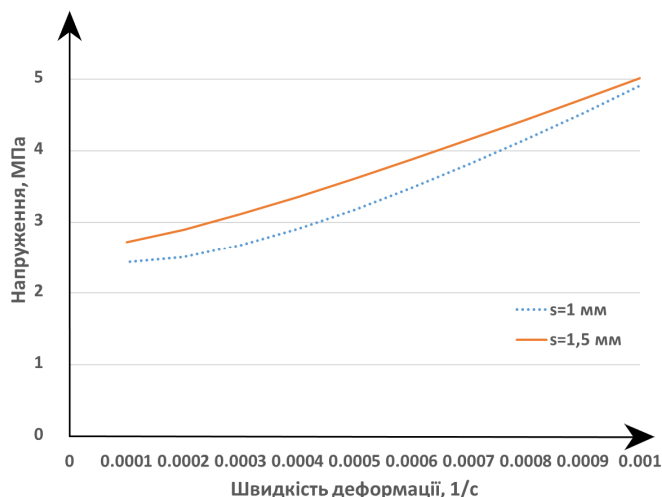


**Рис. 6.** Залежність напружень від швидкості деформацій для титанового сплаву ВТ6 при температурі  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  та питомого моменту  $\left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}} \right]$ : 1 –  $M_1 = 0,6$ , 2 –  $M_2 = 0,7$ , 3 –  $M_3 = 0,8$

Для підтвердження коректності методу побудовані моделі сплаву ВТ6 для заготовок різних товщин 1,0 мм та 1,5 мм для питомого моменту  $M_1 = 0,6 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}}$ . Співставлення графіків залежності напруження від швидкості деформації для заготовок ВТ6 товщиною 1 мм та 1,5 мм показана на рис. 7.

Максимальна похибка в місці найбільшої різниці між графіками складає 15%. Таким чином можемо дійти до висновку, що товщина матеріалу незначно впливає на в'язкопластичну модель деформування.

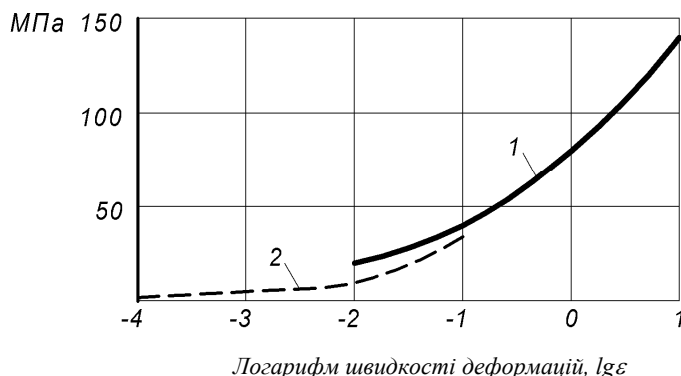




**Рис. 7.** Залежність напружень від швидкості деформацій для титанового сплаву ВТ6 для товщини 1 мм та 1,5 мм при температурі 900 °С та питомого моменту  $M_1 = 0,6 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}}$

Для підтвердження коректності отриманих в'язкопластичних моделей для титанового сплаву ВТ6 було проведено порівняння з даними, які використовуються в науковій практиці. Для цього в якості порівняння були використані властивості матеріалу  $Ti-6Al-4V$  (закордонний аналог ВТ6 по хімічному складу) з бази даних програмного комплексу Deform-3D, результати моделювання якого визнають більшість країн світу.

На рис. 8. дано порівняння моделей.



**Рис. 8.** Порівняння залежності напруження опору деформації титанового сплаву ВТ6 від логарифму швидкості деформацій для: 1 – по даним Deform 3D, 2 – за результатами розрахунку за запропонованим методом

По характеру поведінки кривих, отриманих за розробленим методом, залежність доповнює залежність, яка побудована по даним Deform та її доповнює. Максимальна похибка співпадає з границею з'єднання кривих і дорівнює 14–16 %.

## Висновки

1. Розроблено метод експериментально-аналітичної побудови кривих деформування на підставі випробувань на згин. Даний метод доцільно використовувати для важкодеформуємих матеріалів, а також матеріалів з обмеженою пластичністю. Отримані в'язкопластичні моделі матеріалу можуть бути використані для розрахунку різних операцій формоутворення, ґрунтуючись на гіпотезі про єдину криву.

2. В основу методу покладено вирішення системи рівнянь рівноваги моментів внутрішніх та зовнішніх сил при чистому згині заготовок. Рівняння для знаходження лінійних коефіцієнтів апроксимації кривої деформування, що описують в'язкопластичну модель матеріалу, отримані теоретично на основі кінематичної моделі чистого згину, яка пов'язує геометричні параметри заготовки з компонентами тензора швидкостей деформацій матеріалу заготовки та часом її деформування.

3. Розроблена методика деформування заготовки в ізотермічних умовах гарячої пластичної деформації під дією постійного моменту сил та експериментально визначені залежності зміни внутрішнього радіусу заготовки від часу для титанового сплаву ВТ6 та питомих моментів  $M_1 = 0,6$ ;  $M_2 = 0,7$  та  $M_3 = 0,8 \left[ \frac{H \cdot M}{M} \right]$ .

Отримані залежності дозволили визначити швидкості зміни внутрішнього радіусу кривизни заготовки для умов деформування.

4. З використанням отриманих експериментальних даних вирішена система з чотирьох рівнянь рівноваги матричним методом та отримана залежність напружень від швидкостей деформацій для титанового сплаву ВТ6 при температурі деформування 900 °С та зазначених питомих моментів.

Співставлення кривих для різних моментів навантаження показують:

– якісно характер поведінки кривих однаковий;

– похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  не перевищує 10...14 %.

Показано також, що максимальна похибка в залежності від товщини заготовки в діапазоні товщин 1,0...1,5 мм не перевищує 15 %.

5. Порівняння результатів розрахунку з відомими даними, що використовуються в програмному комплексі Deform 3D для титанового сплаву Ti-6Al-4V (закордонний аналог ВТ6 по хімічному складу), показало:

– по характеру поведінки кривих, отриманих за розробленим методом, вони доповнюють залежності побудовані по даним бібліотеки Deform 3D;

– максимальна похибка лежить в інтервалі 14...16 %.

6. Результати дослідження показали, що криві в'язкопластичного деформування цих матеріалів, можна використовувати для розрахунку технологічних процесів.

## References

- Смирнов О.М. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О.М. Смирнов, С.А. Тулупов, М.А. Цепин, Н.Л. Лисуец, В.В. Бегнарский, Чыонг Ан Нгуен // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – №2. – С. 45–52.
- Surajit Kumar Paul. "Predicting the flow behavior of metals under different strain rate and temperature through phenomenological modeling", Computational Materials Science. – 2012. – Vol. 65. P. 91–99.  
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.06.039>
- Sidoroff, F & Teodosiu, C. "Large Deformations of Solids: Physical Basis and Mathematical Modelling Microstructure and Phenomenological Models for Metals. – 1986. – P. 163–186.
- Christopher P. Kohar, John L. Bassani, Abhijit Brahme, Waqas Muhammad, Raja K. Mishra, Kaan Inal. 2019, "A new multi-scale framework to incorporate microstructure evolution in phenomenological plasticity: Theory, explicit finite element formulation, implementation and validation", International Journal of Plasticity. – Vol. 117. – P. 122–156.
- Ghamarian V.I., Hayes B., Samimi P., Welk B.A., Fraser H.L., Collin P.C. "Developing a phenomenological equation to predict yield strength from composition and microstructure in  $\beta$  processed Ti-6Al-4", Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 172–180.
- Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
- Vyacheslav Titov, Tetiana Garanenko. "Development of an experimental technique and evaluate limit of plastic deformation of titanium alloy OT4 under superplastic conditions", Solid State Phenomena. – 2019. – Vol. 291. P. 183–192.
- Bartier O., Hernot X. "Phenomenological study of parabolic and spherical indentation of elastic-ideally plastic material International Journal of Solids and Structures". – 2012. – Vol. 49, No.14. P. 2015–2026.
- Guoliang Ji, Lei Li, Fangli Qin, Liyuan Zhu, Qiang Li. "Comparative study of phenomenological constitutive equations for an as-rolled M50NiL steel during hot deformation", Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 695. P. 2389-2399.
- Soheil Solhjoo, Antonis I., VakisYutao, T.Pei. "Two phenomenological models to predict the single peak flow stress curves up to the peak during hot deformation Mechanics of Materials". – 2017. – Vol. 105. P. 61–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.12.001>
- Кривицкий Б.А. Совершенствования методики определения реологических свойств титановых сплавов / Б.А. Кривицкий, К.С. Арсентьева // Титан. – 2012. – №4. – С. 14–16.
- Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
- Работнов Ю.Н. Кратковременная ползучесть Ю.Н. Работнов, С.Т. Милейко Москва: Наука, 1970. – 224 с.
- Панченко Е.В. Экспериментальное определение параметров  $m$  и  $K$  уравнения механического состояния материалов при пневмоформовке в режиме сверхпластичности «Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением» изд. Тульского политехнического института, Тула, 1977.
- Enikeev F.U. "Mathematical modeling of processes of pressure treatment of industrial titanium alloys in the superplasticity state", Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – Vol. 49, No. 1. P. 43 – 50.
- Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
- Шломчак Г. Г., Фирсова Т. И., Соснев И. Ю. Аспекты становления и развития реологической концепции. Обработка материалов давлением. – 2009. – Т. 21, №2. С. 147–150.

18. Писаренко Г.С., Стрижало В.А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела – Київ, НПП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2018. – 431 с.
19. Анциферов В.Н. Волокнистые композитные материалы на основе титана / В.Н. Анциферов, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов и др. - М.: Наука, 1990. – 136 с.
20. Титов В.А. Метод экспериментально-аналитического построения кривых деформирования материалов при испытании на изгиб. Сообщение 1/ В.А. Титов, Т.Р. Гараненко // Обработка металлов давлением. – 2015. – №2. – С. 74–80.
21. Титов В.А. Особенности построения вязкопластических моделей металлов при испытании на изгиб. Сообщение 2 / В.А. Титов, Т.Р. Гараненко // Обработка металлов давлением. – 2016. – №1. – С. 45–51.
22. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. – Харьков: Высшая школа, 1981. – 248 с.
23. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1975. – 280 с.

## Experimental-analytical method for construction of visco-plastic material model for titanium alloy VT6 based on bending tests

V. A. Titov, T. R. Garanenko, A. V. Titov

**Abstract.** A method of experimental-analytical construction of deformation curves based on bending tests has been developed. The method is based on the solution of the system of equations of equilibrium of moments of internal and external forces with a clean bending of the workpieces. Equations for finding linear coefficients of approximation of the deformation curve describing the viscoplastic models of the material obtained theoretically on the basis of the kinematic model of pure bending, which relates the geometric parameters of the workpiece to the components of the strain rate tensor of the workpiece material and the time of its deformation. Based on experimentally determined time dependences of the internal radius of the workpiece under the action of a constant torque, using a system of equations, the dependence of the stress intensity on the strain rates for the VT6 titanium alloy at a deformation temperature of 900 °C is obtained. Comparison of the calculation results with the known data used in the Deform 3D software package for the Ti-6Al-4V titanium alloy (foreign analogue of VT6 in chemical composition) showed that the maximum error does not exceed 16 %. The obtained viscoplastic models of the material can be used to calculate the shaping operations in metal forming.

**Keywords:** experimental-analytical method, viscoplastic model of the material, bending tests, VT6 titanium alloy, stress intensity, strain rate, strain rate, kinematic bending model, isothermal deformation conditions, hot plastic deformation.

## Экспериментально-аналитический метод построения вязкопластической модели материала для титанового сплава ВТ6 на основе испытаний на изгиб

В. А. Титов, Т. Р. Гараненко, А. В. Титов

**Аннотация.** Разработан метод экспериментально-аналитического построения кривых деформирования на основании испытаний на изгиб. В основу метода положено решение системы уравнений равновесия моментов внутренних и внешних сил при чистом изгибе заготовок. Уравнения для нахождения линейных коэффициентов аппроксимации кривой деформирования, описывающих вязкопластические модели материала, полученные теоретически на основе кинематической модели чистого изгиба, которая связывает геометрические параметры заготовки с компонентами тензора скоростей деформаций материала заготовки и время ее деформирования. На основе экспериментально определенных зависимостей изменения внутреннего радиуса заготовки от времени под действием постоянного момента сил с использованием системы уравнений получена зависимость интенсивности напряжений от скоростей деформаций для титанового сплава ВТ6 при температуре деформирования 900 °С. Сравнение результатов расчета с известными данными, используемых в программном комплексе Deform 3D для титанового сплава Ti-6Al-4V (зарубежный аналог ВТ6 по химическому составу) показало, что максимальная погрешность не превышает 16 %. Полученные вязкопластические модели материала могут быть использованы для расчета операций формообразования в обработке металлов давлением.

**Ключевые слова:** экспериментально-аналитический метод, вязкопластическая модель материала, испытания на изгиб, титановый сплав ВТ6, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, скорости деформаций, кинематическая модель сгиба, изотермические условия деформирования, горячая пластическая деформация.

### References

1. Smirnov, O.M., Tulupov, S.A., Tsepin, M.A., Lisunets, N.L. and Begnarskii, V.V. (2008), “Reologicheskie modeli kak osnovnoi element modelirovaniya protsessov obrabotki metallov davleniem”, Chyong An Nguen, *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, no.2, pp. 45–52.
2. Surajit Kumar Paul (2012) “Predicting the flow behavior of metals under different strain rate and temperature through phenomenological modeling”, *Computational Materials Science*, vol. 65, pp. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.06.039>

3. Sidoroff, F. and Teodosiu, C. (1986), "Large Deformations of Solids: Physical Basis and Mathematical Modelling Microstructure and Phenomenological Models for Metals", pp. 163–186.
4. Christopher P. Kohar, John L. Bassani, Abhijit Brahme, Waqas Muhammad, Raja K. Mishra, Kaan Inal. (2019), "A new multi-scale framework to incorporate microstructure evolution in phenomenological plasticity: Theory, explicit finite element formulation, implementation and validation", *International Journal of Plasticity*, vol. 117, pp. 122–156.
5. Ghamarian, V.I., Hayes, B., Samimi, P., Welk, B.A., Fraser, H.L. and Collin, P.C. (2016), "Developing a phenomenological equation to predict yield strength from composition and microstructure in  $\beta$  processed Ti-6Al-4", *Materials Science and Engineering*, pp. 172–180.
6. Kachanov, L.M. (1969), *Osnovy teorii plastichnosti* [Fundamentals of plasticity theory], Nauka, Moscow, Russia.
7. Titov, Vyacheslav and Garanenko, Tetiana (2019), "Development of an experimental technique and evaluate limit of plastic deformation of titanium alloy OT4 under superplastic conditions", *Solid State Phenomena*, vol. 291, pp. 183–192.
8. Bartier, O. and Hernet, X. (2012), "Phenomenological study of parabolic and spherical indentation of elastic-ideally plastic material", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 14, pp. 2015–2026.
9. Guoliang, Ji, Lei, Li, Fangli, Qin, Liyuan, Zhu and Qiang, Li. (2017), "Comparative study of phenomenological constitutive equations for an as-rolled M50NiL steel during hot deformation", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 695, pp. 2389–2399.
10. Soheil Solhjoo, Antonis I., Vakis Yutao, T. Pei. (2017), "Two phenomenological models to predict the single peak flow stress curves up to the peak during hot deformation", *Mechanics of Materials*, vol. 105, pp. 61–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.12.001>
11. Krivitskii, B.A. and Arsent'eva, K.S. (2012), "Sovershenstvovaniya metodiki opredeleniya reologicheskikh svoystv titanovykh splavov" *Titan*, no.4, pp. 14–16.
12. Kaibyshev, O.A. and Utyashev, F.Z. (2002), *Sverkhplastichnost', izmel'chenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemyykh splavov* [Superplasticity, structure shredding and processing of hard-alloyed alloys], Nauka, Moscow, Russia.
13. Rabotnov, Yu.N., Rabotnov, Yu.N. and Mileiko, S.T. (1970), *Kratkovremennaya polzuchest'* [Short-term creep], Nauka, Moscow, Russia.
14. Panchenko, E.V. (1977), "Eksperimental'noe opredelenie parametrov m i K uravneniya mekhanicheskogo sostoyaniya materialov pri pnevmofornovke v rezhime sverkhplastichnosti", *Issledovaniya v oblasti plastichnosti i obrabotki metallov davleniem, izd. Tul'skogo politekhnicheskogo instituta*, Tula, Russia.
15. Enikeev, F.U. (2008), "Mathematical modeling of processes of pressure treatment of industrial titanium alloys in the superplasticity state", *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 49, no. 1, pp. 43–50.
16. Malinin, N.N. (1975), *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
17. Shlomchak, G.G., Firsova, T.I., Sosnev, I.Yu. (2009), *Aspekty stanovleniya i razvitiya reologicheskoi kontseptsii. Obrabotka materialov davleniem*, vol. 21, no. 2, pp. 147–150.
18. Pisarenko, G.S. and Strizhalo, V.A. (2018), *Eksperimental'nye metody v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela*, [Experimental methods in the mechanics of a deformable solid], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
19. Antsiferov V.N., Sokolkin, Yu.V., Tashkinov, A.A. and dr. (1990), *Voloknistye kompozitnye materialy na osnove titana* [Titanium Fibrous Composite Materials], Nauka, Moscow, Russia.
20. Titov, V.A. and Garanenko, T.R. (2015), *Metod eksperimental'no-analiticheskogo postroyeniya krivykh deformirovaniya materialov pri ispytanii na izgib* [The method of experimental-analytical construction of material deformation curves during a bending test], *Soobshchenie 1, Obrabotka metallov davleniem*, no.2, pp. 74–80
21. Titov, V.A. and Garanenko, T.R. (2016), *Osobennosti postroyeniya vyazkoplasticheskikh modelei metallov pri ispytanii na izgib* [Features of the construction of viscoplastic models of metals in bending tests], *Soobshchenie 2, Obrabotka metallov davleniem*, no.1, pp. 45–51.
22. Evstratov, V.A. (1981), *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming], Vysshaya shkola, Khar'kov, Ukraine.
23. Kaibyshev, O.A. (1975), *Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov* [Plasticity and superplasticity of metals], Metallurgiya, Moscow, Russia.