

УДК 621.791.4

**О.О. Новомлинець**, канд. техн. наук

**С.В. Олексієнко**, канд. техн. наук

**С.М. Ющенко**, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**В.О. Мартиненко**, канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ КІНЕТИКИ АЛЮМІНІЮ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

**О.А. Новомлинец**, канд. техн. наук

**С.В. Олексієнко**, канд. техн. наук

**С.М. Ющенко**, аспірант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**В.А. Мартыненко**, канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ КИНЕТИКИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

**Oleh Novomlynets**, PhD in Technical Sciences

**Serhii Oleksiienko**, PhD in Technical Sciences

**Svitlana Yushchenko**, PhD student

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

**Volodymyr Martynenko**, PhD in Technical Sciences

The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

### **INVESTIGATION OF ALUMINIUM DEFORMATION KINETICS UNDER HIGH TEMPERATURES**

*Отримано дані для математичного моделювання високотемпературної деформації алюмінію під час статичного навантаження. Показано можливість теоретичного визначення температурної залежності коефіцієнта Пуассона. Результати можуть бути використані для розроблення технології прецизійного з'єднання алюмінію та його сплавів.*

***Ключові слова:** алюміній, деформація, прецизійне з'єднання, модуль пружності, границя текучості, коефіцієнт Пуассона, швидкість повзучості.*

Получены данные для математического моделирования высокотемпературной деформации алюминия при статической нагрузке. Показана возможность теоретического определения температурной зависимости коэффициента Пуассона. Результаты могут быть использованы для разработки технологии прецизионного соединения алюминия и его сплавов.

**Ключевые слова:** алюминий, деформация, прецизионное соединение, модуль упругости, предел текучести, коэффициент Пуассона, скорость ползучести.

The data for the mathematical modeling of aluminium high-temperature deformation under the static load have been received. The possibility of the theoretical determination of Poisson's ratio temperature dependence has been shown. The results can be used for the development of the precision joint technology of aluminium and alloys.

**Key words:** aluminium, deformation, precision joint, elastic modulus, yield point, Poisson's ratio, creep rate.

**Постановка проблеми.** Прецизійне з'єднання алюмінію та його сплавів зварюванням тиском потребує незначних питомих зусиль для забезпечення мінімальної відносної деформації виробів. Це обумовлено тим, що під час підвищення температури відбувається різке зниження пружних властивостей [1] та підвищується плинність матеріалу [2].

У деяких випадках процес реалізують із застосуванням формуючих пристроїв, які дозволяють обмежувати пластичну деформацію алюмінієвих деталей. Однак у випадку виготовлення складних за конфігурацією виробів таке застосування формуючих пристроїв буде ускладненим чи взагалі неможливим.

Тому для розроблення технологічних процесів прецизійного з'єднання є абсолютно необхідним встановлення розрахунковим способом характеру деформування виробів під дією термодформаційного навантаження обраного процесу з'єднання.

Останніми роками проведення розрахунків конструкційних елементів з урахуванням пластичності та повзучості матеріалу інтенсивно вдосконалюється за рахунок використання скінченно-елементного програмного забезпечення, відкриваються можливості більш повного описання елементів конструкцій з урахуванням реальних властивостей матеріалів, характеру навантаження тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з деформаційною теорією пластичності [3] у пружно-пластичному тілі припускається наявність однозначної залежності між сумарними деформаціями та напруженнями. Для ізотропного тіла інтенсивність деформації дорівнює сумі інтенсивностей пластичних та пружних деформацій [3]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^p + \varepsilon_i^e = \frac{2(1+\nu)}{3E} \psi \sigma_i, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_i^p$  – пластична деформація у  $i$ -му напрямку;

$\varepsilon_i^e$  – пружна деформація у  $i$ -му напрямку;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E$  – модуль пружності;

$\psi$  – параметр пластичності;

$\sigma_i$  – напруження у  $i$ -му напрямку.

Залишкова (пластична) деформація, що збільшується з часом при постійному напруженні, називається деформацією повзучості та позначається  $\varepsilon_c$ . Графічне зображення залежності залишкової деформації від часу випробувань у разі постійних напружень та температури називають кривою повзучості (рис. 1).

Швидкість деформації повзучості, або скорочено швидкість повзучості, визначається за виразом [4]:

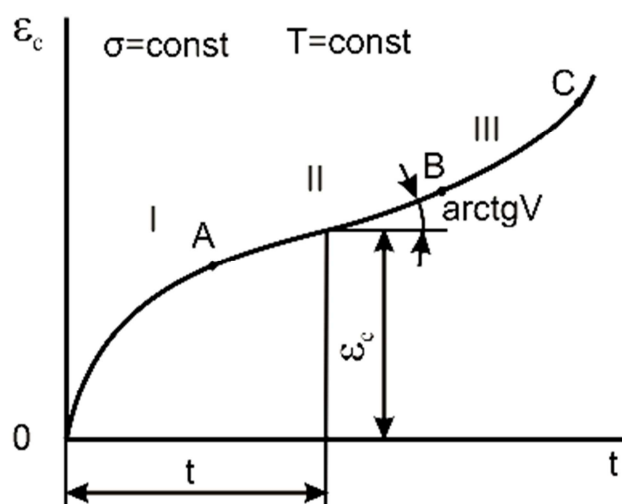


Рис. 1. Крива повзучості [4]:  
I – стадія неусталеної повзучості; II – стадія усталеної повзучості; III – стадія руйнування

$$V = \frac{d\varepsilon_c}{dt} \tag{2}$$

Результати експериментального визначення швидкості повзучості при низьких значеннях напружень на усталеній стадії має вигляд [4]:

$$V = B\sigma^n, \tag{3}$$

де  $B, n$  – параметри матеріалу, що залежать від температури.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Визначення характеру та величини деформації виробу можливе за умови наявності даних щодо зміни залежно від температури нагріву модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі текучості матеріалу та швидкості повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження.

Стосовно зазначених властивостей алюмінію в літературі наведено обмежений ряд даних.

**Мета статті.** Розрахунково-експериментальним способом визначити температурні залежності пружно-пластичних властивостей алюмінію.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення деформації у межах пружності користуються кривими деформування (рис. 2).

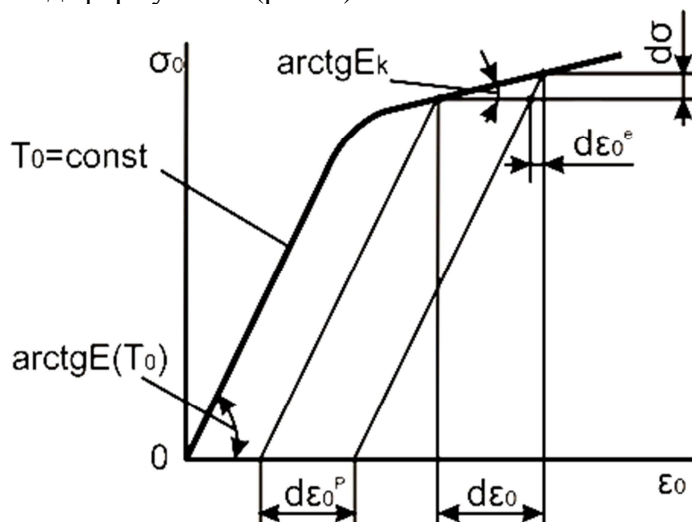


Рис. 2. Крива деформування під час розтягу з постійною температурою [5]

Вивчення повзучості алюмінієвих сплавів у разі стиску показало, що різниця між кривими повзучості під час розтягу та стиску не виходять за межі смуги розкиду точок [6].

Задача щодо визначення границі між пружними  $\varepsilon^e$  та пластичними  $\varepsilon^p$  деформаціями залежно від зміни модуля пружності  $E$  та границі текучості  $\sigma_T$  від температури зводиться до визначення величини  $arctg(E)$ , якщо вона вирішується графічно за кривими деформування, або до визначення  $\varepsilon^e$  за законом Гука. Розраховані значення вказаних величин для алюмінію з використанням даних стосовно зміни модуля пружності наведені у табл. 1.

Таблиця 1

*Зміна модуля пружності та границі текучості алюмінію залежно від температури*

T, K	293	373	473	573	673	773	873
$\sigma_T, \text{МПа}$ [2]	12	11,5	11	10	5,1	2	1,5
$E, \text{Гпа}$ [1]	71	70	66	61	56	50	44
$arctg(E)$	89,193	89,182	89,132	89,061	88,977	88,854	88,698

На рис. 3 наведено графічні залежності функції  $\varepsilon=f(t)$  під час дослідження зразків з алюмінію марки АД00 розмірами  $10 \times 10 \times 10$  мм на одновісний стиск при температурі

853 К. Використання такої температури авторами [7; 8] обґрунтоване тим, що прецизійне з'єднання алюмінію та його сплавів можливе за рахунок використання проміжних прошарків системи *Al-Si*, евтектична температура плавлення яких становить значення 850 К.

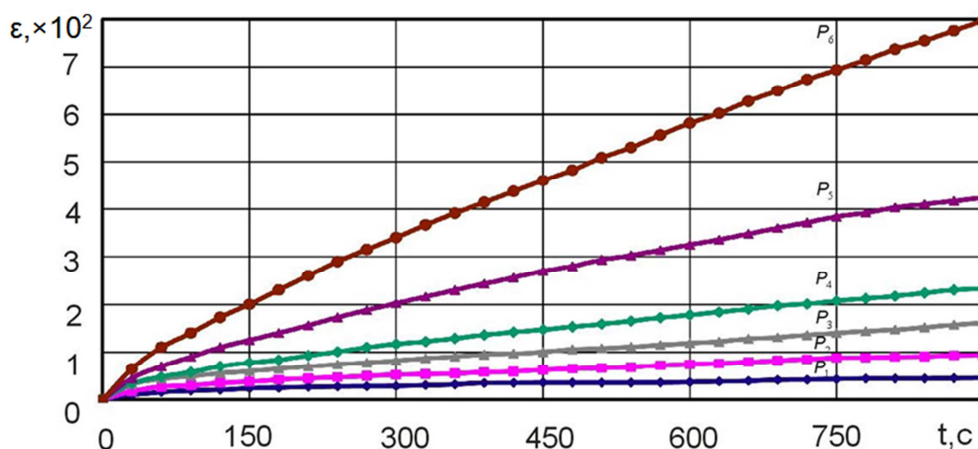


Рис. 3. Залежність величини деформації зразка з АД00 від часу дії притискаючого зусилля,  $T=853$  К:  
 $P_1 = 0,5$  МПа;  $P_2 = 0,75$  МПа;  $P_3 = 1$  МПа;  $P_4 = 1,25$  МПа;  $P_5 = 1,5$  МПа;  $P_6 = 1,75$  МПа

Наприклад, для випадку, коли питоме зусилля становить 1,5 МПа (крива  $P_5$  на рис. 3), функція  $\varepsilon=f(t)$  буде мати вигляд:

$$\varepsilon_{1,5} = -2 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0062t + 0,3712,$$

а швидкість на всіх стадіях усталеної повзучості може бути визначена за виразом (2).

Однак зазначених і отриманих вище результатів недостатньо для отримання об'ємної картини деформування виробу. Для можливості визначення складових деформації за трьома напрямками необхідно знати коефіцієнт поперечної деформації, або коефіцієнт Пуассона.

У деяких літературних джерелах [9–12] наводяться різноманітні залежності для визначення коефіцієнта Пуассона  $\nu$  через параметр Грюнайзена  $\gamma$ , який є мірою ангармонічності сил, що діють між атомами або молекулами твердого тіла і, подібно до  $\nu$ , широко використовується для описання властивостей кристала.

Найбільш придатними нам видаються співвідношення, представлені у роботі [10], які дозволяють визначати  $\nu$  при відомому  $\gamma$  і навпаки:

$$\nu = \frac{4/3\gamma - 1}{2\gamma + 1}, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{3(1 + \nu)}{2(2 - 3\nu)}. \quad (5)$$

Для більшості чистих металів та певних простих з'єднань добре виконується закон Грюнайзена, що встановлює однакову температурну залежність теплоємності та коефіцієнта теплового розширення (КТР).

Для алюмінію при кімнатній температурі ( $T = 293$  К) коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,34$ , тоді під час підстановки у (5) параметр Грюнайзена  $\gamma$  становить 2,051.

Відомі спроби зіставлення коефіцієнта Пуассона з параметром Грюнайзена. Так, автори [10] наводять таку залежність:

$$1 - 2\nu = \frac{E\alpha V}{\gamma C_v}, \quad (6)$$

де  $E$  – модуль пружності;

$\alpha$  – КТР;

$V$  – молярний об'єм;

$C_v$  – молярна теплоємність при сталому об'ємі.

Але для визначення коефіцієнта  $\nu$  ця формула потребує знання п'яти різних параметрів.

Згідно з [13] закон Грюнайзена подається у дещо іншому вигляді:

$$\alpha = \frac{\gamma C_v^{yo}}{3K}, \quad (7)$$

де  $C_v^{yo} = C_v/V$  – питома молярна теплоємність при постійному об'ємі;

$K$  – ізотермічний модуль усебічного (об'ємного) стиску, який вважається таким, що мало залежить від температури, тобто для інженерних розрахунків його значення можна брати постійним. Для алюмінію при кімнатній температурі  $K = 7,5 \cdot 10^{10}$  Па.

Встановлено, що при будь-яких температурах для металів відношення КТР до питомої теплоємності дорівнює сталій величині [14]:

$$\frac{\alpha}{C_v^{yo}} = \frac{\gamma}{3K} = \text{const}. \quad (8)$$

З урахуванням (8) формула (6) набуває вигляду:

$$1 - 2\nu = \frac{E\alpha}{\gamma C_v^{yo}} = \frac{E}{3K}. \quad (9)$$

Звідси коефіцієнт Пуассона:

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E}{3K} \right). \quad (10)$$

На прикладі алюмінію марки АД00 за формулою (10) було проведено розрахунок коефіцієнта Пуассона при відомих з літературних джерел значеннях модуля пружності (табл. 1) та модуля об'ємного стиску. Одержані значення коефіцієнтів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта Пуассона алюмінію залежно від температури

Температура, К	293	373	473	573	673	773	873
$\nu$	0,342	0,344	0,353	0,364	0,376	0,389	0,402

### Висновки та пропозиції.

1. Встановлено можливість теоретичного визначення температурної залежності коефіцієнта Пуассона алюмінію на основі закону Грюнайзена.

2. Отримані в роботі дані щодо зміни механічних властивостей алюмінію залежно від температури можуть бути використані для математичного моделювання статично навантажених високотемпературних конструкцій.

### Список використаних джерел

1. Бадамшин И. Х. От четырех к одному. Силы внутриатомного взаимодействия и прочность материалов / И. Х. Бадамшин. – М. : Академия естествознания, 2014.
2. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Ч. 1. Деформация и разрушение. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.
3. Работнов Ю. Н. Соппротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – М. : Физматгиз, 1963. – 456 с.
4. Биргер И. А. Соппротивление материалов : учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
5. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

6. Сапунов В. Т. Основы теории пластичности и ползучести : учебное пособие / В. Т. Сапунов. – М. : МИФИ, 2008. – 220 с.
7. Спосіб реактивно-флюсового паяння алюмінію / С. В. Олексієнко, Р. А. Куликовський, В. О. Мартиненко, С. М. Ющенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – № 2. – С. 84–87.
8. Олексієнко С. В. Вплив електропереносу на дифузійну кінетику в системі Al-Si-Al / С. В. Олексієнко, В. О. Мартиненко, Р. А. Куликовський // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2013. – № 4 (69). – С. 91–95.
9. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела / Л. Жирифалько. – М. : Мир, 1975. – 382 с.
10. Беломестных В. Н. Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел / В. Н. Беломестных, Е. П. Теслева // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 5. – С. 8–12.
11. Дармаев М. В. Ангармонизм колебаний решетки и поперечная стеклообразных и кристаллических материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 01.04.14 «Теплофизика и тероретическая теплотехника» / М. В. Дармаев. – Улан-Удэ, 2009. – 19 с.
12. Сандитов Д. С. Ангармонизм колебаний решетки и поперечная деформация кристаллических и стеклообразных твердых тел / Д. С. Сандитов, В. В. Мантатов, Б. Д. Сандитов // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 5. – С. 947–951.
13. Физическая энциклопедия : в 5 т. Т. 1 / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – 704 с.
14. Кириллин В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 407 с.