

УДК 621.791.4

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ
ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ****Махненко О.В., Великоіваненко О.А., Мілєнін О.С.,
Фальченко Ю.В., Новомлинець О.О.****METHODOLOGY OF CALCULATION OF PRESSURE WELDING MODES
FOR OBTAINING PRECISION NON-DETACHABLE COMPOUNDS****Makhnenko O.V., Velykoivanenko O.A., Milienin O.S.,
Falchenko Yu.V., Novomlynets O.O.**

Розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів. Розроблено розрахунково-експериментальну методику визначення оптимальних режимів прецизійного зварювання тиском на основі температурних залежностей пружно-пластичних властивостей матеріалів, які зварюються. Побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах зварювання визначати оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються. Порівняльний аналіз параметрів режиму отриманих експериментально та розрахованих за допомогою розробленої методики показує співпадіння результатів на 90 %.

Ключові слова: Прецизійні нероз'ємні з'єднання, пружно-пластичні властивості, математична модель, розрахунково-експериментальна методика, оптимальні режими зварювання.

Постановка проблеми. При зварюванні тиском деформація має вирішальне значення для утворення якісного зварного з'єднання. Однак при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій та виробів для різних галузей часто виникає необхідність отримання зварних з'єднань з обмеженим рівнем деформації основних матеріалів. На сьогоднішній день відсутні дані щодо визначення кількісних характеристик прецизійності зварних з'єднань, отриманих способами зварювання тиском, але більшість дослідників говорячи про прецизійні з'єднання оцінюють при цьому деформацію основних матеріалів на рівні не більше 1-2 % вихідного розміру деталей: при зварюванні встик – по висоті зразка або зміні діаметру, при точковому зварюванні – по товщині зразка (глибині вм'ятини у точці).

У зв'язку з цим, прецизійне зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів потребує використання додаткових засобів активації поверхонь та вибору оптимальних параметрів зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$, $t_{зв}$), які б забезпечили як утворення якісного нероз'ємного з'єднання так і мінімальний рівень деформації основних матеріалів.

Встановлення оптимальних режимів зварювання експериментальним шляхом потребує значних витрат часу, матеріалів та енергоресурсів. Використання скінчено-елементного програмного забезпечення, дозволяє мінімізувати вказані витрати та більш детально описати елементи конструкції з урахуванням реальних властивостей матеріалів, характеру навантаження та температуро-часового впливу на деталі, які зварюються.

Тому актуальним є питання встановлення розрахунковим способом характеру деформування виробів під дією термодформаційного навантаження відповідного процесу зварювання та розробки методики розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з деформаційною теорією пластичності для пружно-пластичного тіла існує залежність між деформацією та напруженнями. Для ізотропного тіла інтенсивність деформації дорівнює сумі інтенсивностей пластичних та пружних деформацій [1]. Пластична деформація, що збільшується з часом при постійному напруженні, називається деформацією повзучості (ϵ_c). Графічне зображення залежності пластичної деформації від часу випробувань у разі дії постійних напружень та температури називають кривою повзучості (рис. 1) [2].

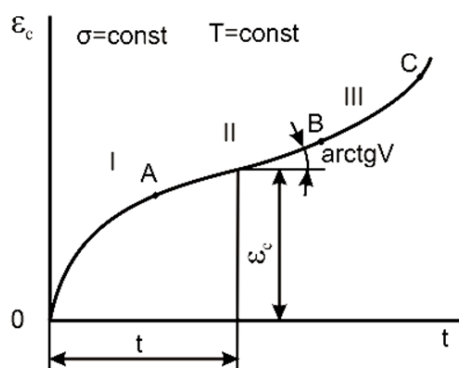


Рис. 1. Крива повзучості [2]: I – стадія неусталеної повзучості; II – стадія усталеної повзучості; III – стадія руйнування.

Для визначення характеру та величини деформації виробу необхідні дані про модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю текучості матеріалу в залежності від температури нагріву, а також швидкості повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. На сьогоднішній день в літературі наявна обмежена інформація щодо основ прогнозного математичного моделювання напруженого стану в прецизійних нероз'єднаних з'єднаннях в межах схеми «основний матеріал – умови зварювання».

Метою роботи є розробка розрахунково-експериментальної методики визначення оптимальних режимів прецизійного зварювання тиском на основі температурних залежностей пружно-пластичних властивостей матеріалів, які зварюються.

Викладення основного матеріалу. Розроблено математичну модель для прогнозування термодформаційних процесів при дифузійному зварюванні металевих матеріалів [3], яка знайшла застосування у спеціалізованому програмному забезпеченні «Weldprediction», розробленому в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона.

Спільний вплив високих температур і тиску на елементи, що зварюються, зумовлює появу і розвиток пружно-пластичних деформацій. Для моделі, яка використовується, прийнято, що приріст тензора деформації у довільній точці з координатами x , y з момент часу t представляється у вигляді суми:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^c, \quad (1)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ – пружна складова тензора $d\varepsilon_{ij}$,

$d\varepsilon_{ij}^p$ – складова від миттєвої пластичності та

$d\varepsilon_{ij}^c$ – складова деформації повзучості.

Тензор $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язаний з тензором напружень σ_{ij} законом Гука:

$$d\varepsilon_{ij}^e = d \left[\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi) \right], \quad (2)$$

де G – модуль зсуву, $G = \frac{E}{1+2\nu}$, K – модуль

об'ємного стискування, $K = \frac{1-2\nu}{E}$, E – модуль Юнга,

ν – коефіцієнт Пуассона, φ – функція вільної об'ємної зміни, яка пов'язана з нагріванням, структурними змінами і т.п., у найпростішому випадку $\varphi = \alpha(T - T_0)$, δ_{ij} – одиничний тензор, σ – середнє значення нормальних компонент тензора σ_{ij} .

Величина тензора $d\varepsilon_{ij}^p$ характеризує появу і розвиток непружних деформацій "миттєвої" пластичності. В рамках сучасних теорій пластичної течії складова деформації повзучості $d\varepsilon_{ij}^p$ пов'язана з тензором напружень σ_{ij} залежністю:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (3)$$

де $d\lambda$ – скалярна функція, яка визначається умовою текучості Мізеса, тобто:

$$\text{при } f = \frac{1}{2} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) - \sigma_S^2(T) < 0 \quad (4)$$

та $f = 0$, але $df < 0$ величина $d\lambda \equiv 0$;
при $f = 0$ та $df > 0$ величина $d\lambda > 0$;
стан $f > 0$ недопустимо,

де $\sigma_S(T)$ – напруження деформування (межа текучості матеріалу) при температурі T .

Для деформацій повзучості $d\varepsilon_{ij}^c$ використовується рівняння зв'язку у вигляді [3]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T) (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) dt, \quad (5)$$

де $\Omega(\sigma_i, T)$ – скалярна функція повзучості матеріалу при температурі T та рівні напруженості, що визначається інтенсивністю напружень σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)}. \quad (6)$$

Для даної задачі, коли при дифузійному зварюванні найбільш важливо враховувати деформації

повзучості $d\epsilon_{ij}^c$, оскільки від них істотно залежить процес деформування елементів, що зварюються, функцію $\Omega(\sigma_i, T)$ раціонально вибирати на основі експериментів по деформуванню при підвищеній температурі зразків з даного матеріалу.

В процесі одномірного навантаження вздовж осі x при $\sigma_{xx} < \sigma_S(T)$ $T = \text{const}$ з (1), (2), (3) витікає якщо

$$\frac{d\epsilon_{xx}}{dt} = 0$$

$$\frac{d\epsilon_{xx}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma_{xx}}{E} \right) + \Omega(\sigma_i, T) \frac{2\sigma_{xx}}{3} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_i = |\sigma_{xx}|$$

Якщо $\Omega(\sigma_i, T) = \Omega_1(\sigma_i) \Omega_2(T)$, то з (3.8) витікає:

$$\frac{d\sigma_{xx}}{\Omega_1(\sigma_i) \sigma_{xx}} = -\frac{2}{3} E \cdot \Omega_2(T) dt. \quad (8)$$

При простому розтягуванні в ізотермічних умовах $\sigma_i = \sigma_{xx}$, відповідно при $\Omega_1(\sigma_i) = \sigma_{xx}^n$, отримаємо після інтегрування від $t = 0$ до t :

$$\Omega_2(T) = \frac{3}{2E(T)t \cdot n} \left[\frac{1}{\sigma_{xx}^n(t)} - \frac{1}{\sigma_{xx}^n(0)} \right]. \quad (9)$$

Цю залежність можна апроксимувати типовою залежністю [3]:

$$\Omega_2(T) = A \exp\left(\frac{G_c}{T+273}\right), \text{ МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{час}^{-1} \quad (10)$$

або

$$\Omega_2(T) = \exp\left(B + \frac{G_c}{T+273}\right), \text{ МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{час}^{-1} \quad (11)$$

де $A, B = \ln(A), G_c$ – постійні.

Відповідно до вищесказаного було розроблено схему побудови математичної моделі спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх дифузійному зварюванні, яку представлено на рисунку 2.

На підставі експериментальних та літературних даних було визначені коефіцієнти функції повзучос-

ті сплавів алюмінію (АД00, АМц), міді (М1) та сталі 45 (таблиця 1), з'єднання яких в однорідному поєднанні та різнорідному з іншими більш твердими матеріалами часто вимагає обмеження пластичної деформації основних матеріалів. У зв'язку з тим, що згідно експериментальних даних, поведінка міді М1 та сталі 45 не достатньо точно описується функцією повзучості (залежність від температури витримки має істотно нелінійну залежність, яку складно описати аналітично), тому було запропоновано до використання параметру G_c , що залежить від прикладених навантажень для міді М1 (табл. 2) та від температури і тиску для сталі 45 (табл. 3).

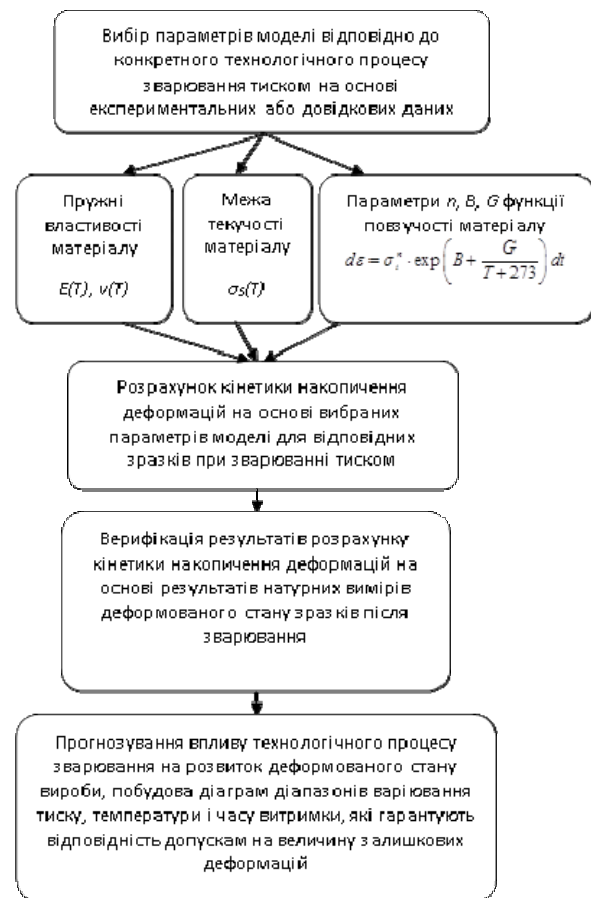


Рис. 2. Схема методики розрахунку параметрів процесу прецизійного зварювання тиском.

Таблиця 1

Коефіцієнти функції повзучості			
Матеріал \ Параметр	n	B	G _c
АМц	1,4388	9,1	-11000
АД00	1,4388	9,1	-9320
М1	0,7	-2,604	див. табл. 2
Сталь 45	0,765	1,178	див. табл. 3

Таблиця 2

Залежність параметру G_c від тиску для міді М1

P , МПа	2	3	5	8	10	13	15
G_c , К	-6150	-6300	-6600	-7150	-7400	-7840	-8200

Таблиця 3

Залежність параметру G_c від тиску та температури для сталі 45

T , К	1073				1273				1473			
P , МПа	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
G_c , К	-3500	-4700	-5200	-5550	-3000	-3700	-4400	-5050	-2700	-3900	-4900	-5550

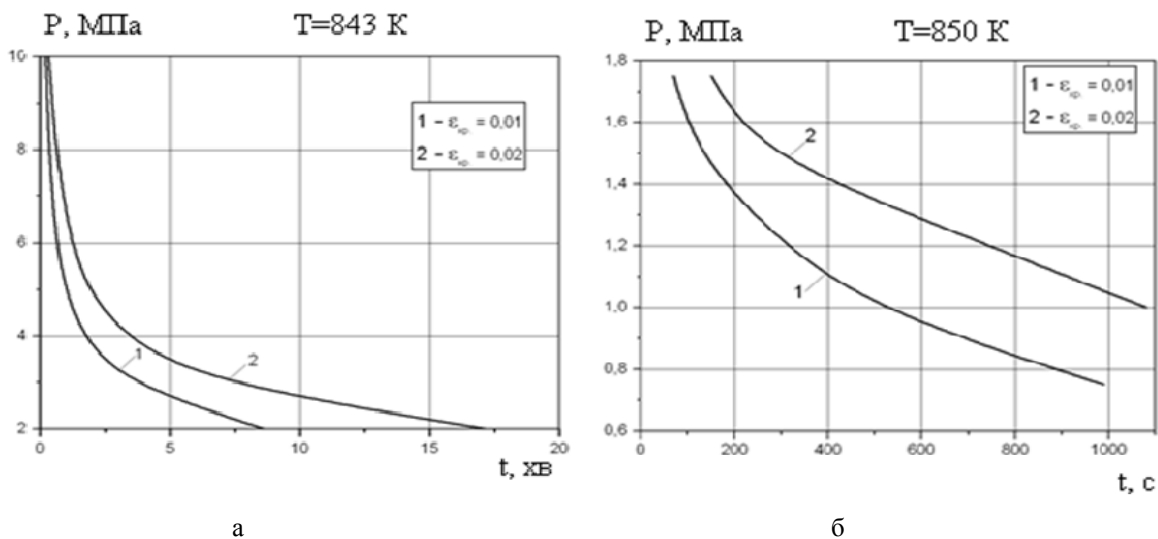


Рис. 3. Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сплаву: а – АМц; б – АД00

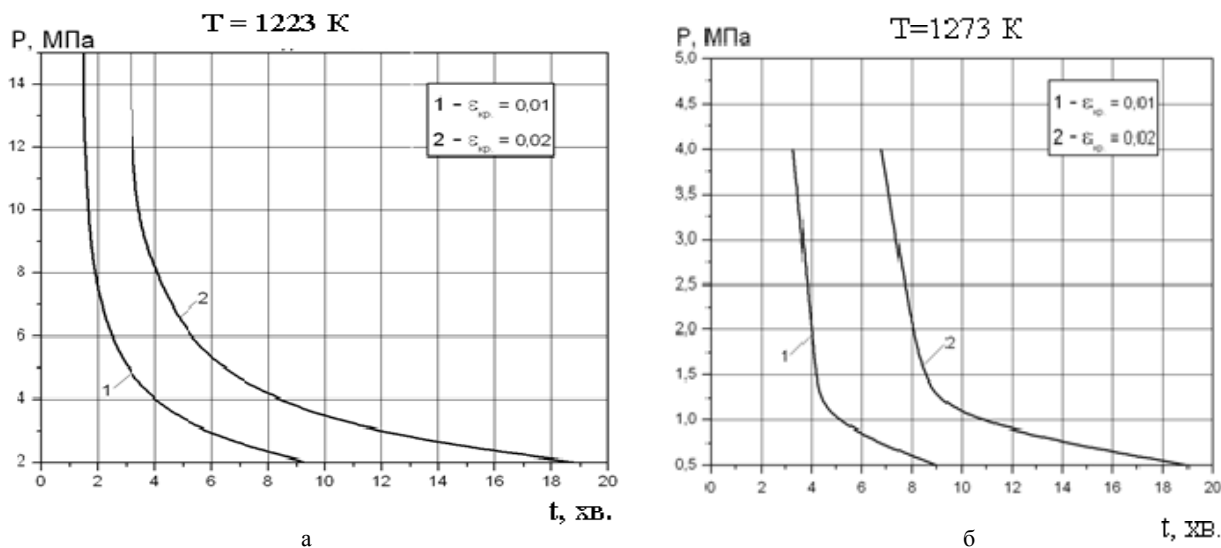


Рис. 4. Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків: а – з міді М1; б – зі сталі 45

Практично важливими для отримання прецизійних є залежності величини витримки при дифузійному зварюванні від прикладеного тиску, при якому для конкретної температури досягаються граничні залишкові деформації $\epsilon_{кр} = 0,01-0,02$ (1-2%). Тому, на основі розробленої методики та кривих повзучості, для вказаних матеріалів були побудовані

діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків для температур 0,8-0,9 $T_{пл}$, які зазвичай використовуються при дифузійному зварюванні [4] (рис. 3-4).

Згідно з результатами розрахунків, наведених на рисунках 3-4, в залежності від обраної температури зварювання максимальне допустимий час ви-

тримки для виготовлення прецизійних нероз'ємних з'єднань варіюється від десятків секунд до десятків хвилин. Остаточне рішення про вибір конкретних параметрів режиму прецизійного зварювання необхідно приймати, з одного боку, виходячи з вимог щодо максимально допустимої залишкової деформації зварного виробу, з іншого боку, з врахуванням додаткових засобів активації, що використовуються для достатньої розвиненості дифузійних процесів.

Порівняльний аналіз параметрів режиму отриманих експериментально в роботах [5, 6] та розрахованих за допомогою розробленої методики показує співпадіння результатів на 90 %, що свідчить про ефективність застосування даної методики та можливість її використання при розробці конкретних технологій прецизійного зварювання тиском різних матеріалів.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$).

Розроблено методику, що дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється; температуру нагріву; допустимий рівень деформації основного матеріалу; в результаті розрахунку отримувати: максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації. За результатами проведених численних експериментів побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах зварювання визначати оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються.

Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних отриманих за допомогою розробленої методики показав співпадіння результатів на 90 %, що свідчить про ефективність застосування даної методики та можливість її використання при розробці конкретних технологій прецизійного зварювання тиском різних матеріалів.

Література

1. Работнов Ю.Н. Сопrotивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1963. – 456 с.
2. Биргер И.А. Сопrotивление материалов: учебное пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
3. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. Киев. Наукова думка. 2006, 618 с.
4. В. А. Бачин, и др., Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебник для вузов. –М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
5. О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, В. О. Мартиненко, «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», Технічні науки та технології, № 2 (2), С. 67–72, 2015.
6. Falchenko Y., Novomlynets O., Polovetskyi E. Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces. Scientific and educational journal, Geneve, Switzerland, 2016, July, № 6. P. 65-70.

References

1. Rabotnov, Yu. N. (1963). *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials]. Moscow: Fizmatgiz (in Russian).
2. Birger, I. A., Mavljutov, R. R. (1986). *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials]. Moscow: Nauka (in Russian).
3. Makhnenko, V. I. (2006). *Resurs bezopasnoy ekspluatatsii svarnykh soyedineniy i uzlov sovremennykh konstruktсий* [Resource of safe operation of welded joints and units of modern structures]. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
4. Bachin, V. A. (1991). *Teoriya, tekhnologiya i oborudovaniye diffuzionnoy svarki*: [Theory, Technology and Equipment of Diffusion Welding]. Moscow: Mechanical engineering (in Russian).
5. Novomlynets, O. O., Oleksiyenko, S. V., Yushchenko, S. M., Martinenko, V. O., (2015). *Doslidzhennya deformatsiynoyi kinetyky alyuminiyu pry vysokyykh temperaturakh* [Deformation of the deformation kinetic of aluminum at high temperatures]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical sciences and technologies*, No. 2 (2), pp. 67-72 (in Ukrainian).
6. Falchenko, Y., Novomlynets, O., Polovetskyi, E. (2016). Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces. *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, No. 6. pp. 65-70.

Махненко О.В., Великованенко Е.А., Миленин А.С., Фальченко Ю.В., Новомлинець О.А. Методика расчета режимов сварки давлением для получения прецизионных неразъемных соединений

Разработана математическая модель совместного развития упругих деформаций, мгновенной пластичности и ползучести для условий прецизионной сварки давлением металлических материалов. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения оптимальных режимов прецизионной сварки давлением на основе температурных зависимостей упруго-пластических свойств свариваемых материалов. Построены диаграммы, позволяющие при различных температурах сварки определять оптимальное соотношение давления и времени выдержки для достижения необходимого уровня деформации соединяемых материалов. Сравнительный анализ параметров режима полученных экспериментально и рассчитанных с помощью разработанной методики показывает совпадение результатов на 90%.

Ключевые слова: Прецизионные неразъемные соединения, упруго-пластические свойства, математическая модель, расчетно-экспериментальная методика, оптимальные режимы сварки.

Makhnenko O.V., Velykoivanenko O.A., Milienin O.S., Falchenko Yu.V., Novomlynets O.O. Methodology of calculation of pressure welding modes for obtaining precision non-detachable compounds

The mathematical model of joint development of elastic deformations, instant plasticity and creeping for conditions of precision welding by pressure of metal materials has been developed. The design-experimental methods of determination of optimal modes of precision welding on the basis of tempera-

ture dependences of elastic-plastic properties of welded materials has been developed. The diagrams that allow determining the optimal ratio of pressure and shuttering time to achieve the required level of deformation of interconnected materials at different welding temperatures has been constructed. The comparative analysis of the parameters of the regime obtained experimentally and calculated by the usage of the developed method shows the 90% coincidence of the results.

Keywords: Precision non-detachable joints, elastic-plastic properties, mathematical model, calculation-experimental methods, optimal welding conditions.

Махненко О.В. – докт. техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Великоіваненко О.А. – канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник відділу математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;

Міленін О.С. – канд. техн. наук, науковий співробітник відділу математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;

Фальченко Ю.В. – докт. техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
E-mail: omega06@ukr.net

Новомлинець О.О. – канд. техн. наук, доцент кафедри ЗВ та АПБК ЧНТУ, ЧНТУ – Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів.
E-mail: oon1@urk.net

Рецензент: д.т.н., професор **Глікін М.А.**

Стаття подана 23.03.2017