

# РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НАПЛАВЛЕНИХ СТАЛЕВИХ ТОНКОЛИСТОВИХ ПЛАСТИН

І.К. Сенченков<sup>1</sup>, І.О. Рябцев<sup>2</sup>, О.П. Червінко<sup>1</sup>, А.А. Бабінець<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. 02000, вул. П. Нестерова, 3

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Розроблено скінченно-елементну методику розрахунку та досліджено напружено-деформований і мікроструктурний стан при одно- та двошаровому наплавленні пластин товщиною 3 мм зі сталі Ст3 дротами Св-Х19Н18Г6М3В2, ПП-Нп-25Х5ФМС і Св-08А. Проведено розрахунки НДС, мікроструктурного стану і формозміни пластин при наплавленні за умов гладкого опирання. Модель плоского деформованого стану (ПДС) прогнозує більші прогини порівняно з моделлю плоского напруженого стану (ПНС), за виключенням матеріалів з мартенситними перетвореннями (ПП-Нп-25Х5ФМС); при наплавленні матеріалів з мартенситними перетвореннями мають місце більші прогини за рахунок об'ємних ефектів перетворення. За винятком наплавленого металу з мартенситними перетвореннями (25Х5ФМС) модель одночасного наплавлення шару прогнозує більший прогин порівняно з моделлю поваликового наплавлення і може використовуватися для оцінки верхньої границі прогину. Отримана задовільна кореляція розрахункових і експериментальних даних щодо прогинів наплавлених пластин. Визначено раціональні схеми опирання та закріплення кромки елементів, які забезпечують мінімальні залишкові прогини. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова:* дугове наплавлення, напружено-деформований стан, деформації наплавлених пластин, модель Боднера-Партома, методика розрахунку прогинів

Робота присвячена розробці методики розрахунку поточного і залишкового напружено-деформованого і мікроструктурного стану, а також прогинів сталевих пластин товщиною 3 мм при наплавленні шарами сталей з різною структурою та властивостями. Розглядаються процеси з одно- і двошаровим наплавленням. В якості об'єктів дослідження вибрано пластини зі сталі Ст3 товщиною 3 мм, що наплавляються дротами Св-Х19Н18Г6М3В2, ПП-Нп-25Х5ФМС та Св-08А.

Схема накладання і форма валиків, а також умови закріплення бічних кромки пластин у процесі наплавлення, які були прийняті при розробці методики розрахунку, показані на рис. 1. Розгля-

дається схема жорсткого закріплення лівого краю пластини та повільного її правого краю. Приймається:  $l = 100$  мм,  $h = 3$  мм,  $\Delta h = 2,4$  мм,  $\Delta l = 5$  мм,  $l_c = 25$  мм. Швидкість наплавлення валиків 31 м/год. Довжина пластини в напрямку осі  $Oz$   $L = 200$  мм.

Для приведення тривимірної задачі до двовимірної застосовується схема одночасного (миттєвого) накладання валика в напрямку  $Oz$ . У цьому випадку завдання зводиться до задачі про плоский деформований (ПДС) або плоский напружений стан (ПНС) в площині  $Oxy$  в залежності від умов закріплення та умов опирання пластини.

При двошаровому наплавленні розглядаються схеми накладання валиків другого шару без зміщення (рис. 2, а) та з їх зміщенням на 50 % (рис. 2, б). В якості спрощеної розглядається також схема послідовного одночасного накладання шарів металу, що наплавляється, з інтервалом, який диктується умовами наплавлення (рис. 2, в).

Експериментальні дослідження деформацій пластин зі сталі Ст3 товщиною 3 мм в процесі наплавлення проводились за наступною схемою. Наплавлення дротом Св-Х19Н18Г6М3В2 забезпечувало отримання наплавленого металу з аустенітної структурою; дротом ПП-Нп-25Х5ФМС – мартенситно-бейнітного наплавленого металу з невеликою кількістю залишкового аустеніту; дротом Св-08А – отримання феритно-перлітного наплавленого металу, близького за хімічним складом

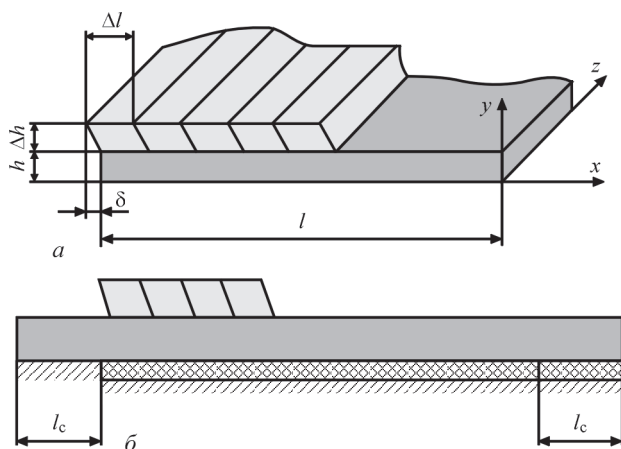


Рис. 1. Схема накладання і форма валиків (а) та умови закріплення бічних кромки пластин у процесі наплавлення (б)

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>

© І.К. Сенченков, І.О. Рябцев, О.П. Червінко, А.А. Бабінець, 2021

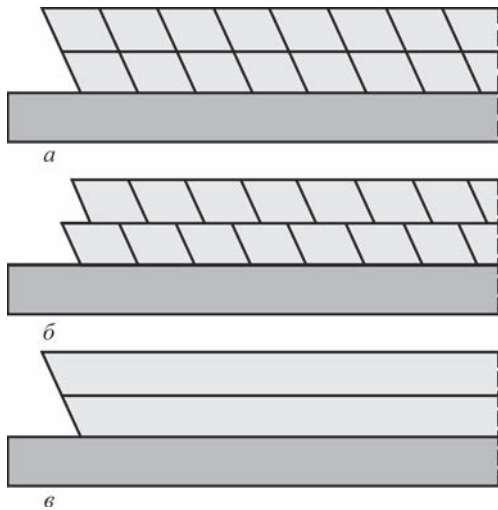


Рис. 2. Схема двошарового наплавлення пластин: *a* – без зміщення валиків другого шару; *б* – зі зміщенням валиків другого шару на 50 %; *в* – одночасне наплавлення шарів

і властивостями до основного металу. Вибір саме таких наплавлювальних матеріалів пояснюється різницею в їх фізико-механічних властивостях і структурному стані в порівнянні з основним металом і, відповідно, їх передбачуваним різним впливом на рівень залишкових напружень та деформацій пластин, які наплавлялися.

Так, при наплавленні дротом Св-Х19Н18Г6М3В2 рівень деформацій пластин з Ст3 буде залежати від

впливу місцевого нагріву та значної різниці коефіцієнта термічного розширення (КТР) основного і наплавленого металу. Для дроту ПП-Нп-25Х5ФМС – від впливу місцевого нагріву і мартенситного перетворення, яке супроводжується збільшенням обсягу наплавленого металу, оскільки різниця в КТР в даному випадку мінімальна. А при наплавленні дротом Св-08А рівень деформацій буде залежати тільки від впливу місцевого нагріву, тому що різниці в КТР і структурному стані між основним та наплавленим металом практично немає.

Наплавлення усіма дротами виконувалося одиничними валиками з перекриттям сусідніх валиків на  $\approx 50\%$ , на однаковому режимі: струм – 150 А; напруга – 22 В; швидкість наплавлення – 31 м/год. Такий режим наплавлення забезпечував отримання наплавленого шару завтовшки  $\approx 2,4$  мм. Наплавлення пластин здійснювалося в один і два шари для кожного типу дроту.

Пластини для наплавлення закріплювалися на зварювальному столі з мідною поверхнею і притискалися до нього за допомогою двох сталевих планок відповідно до розрахункової схеми: одна з планок притискала край пластини до столу, повністю перешкоджаючи його переміщенню (жорстке закріплення), а інша – не давала краю пластини деформуватися в вертикальному напрямку, але да-

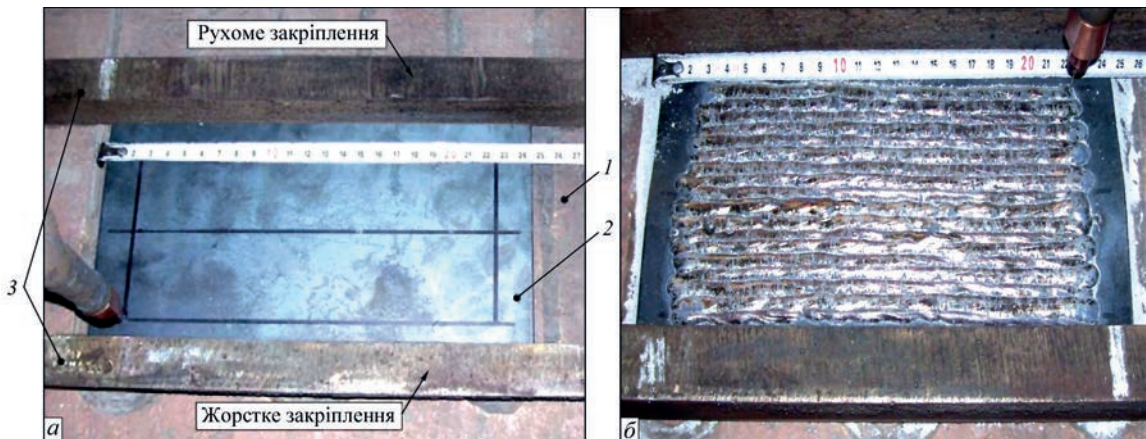


Рис. 3. Спосіб закріплення пластин на зварювальному столі (*a*): 1 – зварювальний стіл з мідною пластиною, 2 – пластина, що наплавляється, 3 – притисні планки; (*б*) – зовнішній вигляд пластини після наплавлення

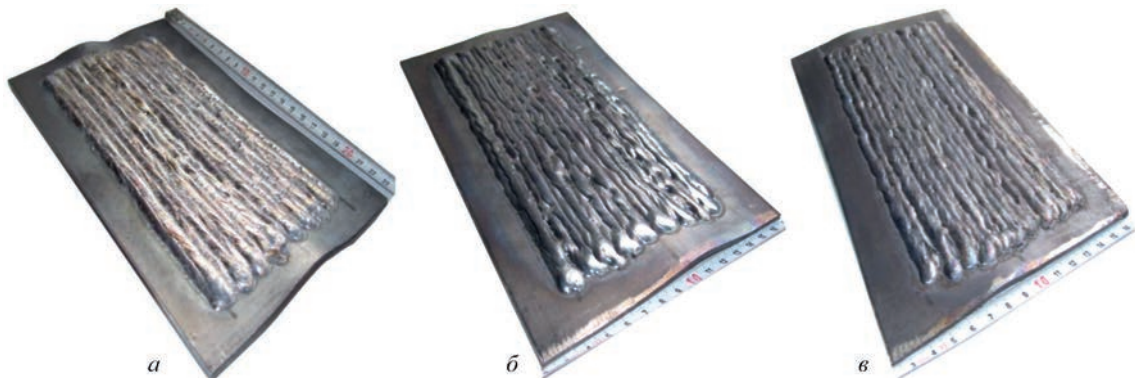


Рис. 4. Зовнішній вигляд деформованих пластин після одношарового наплавлення дротами: *a* – Св-Х19Н18Г6М3В2; *б* – Св-08А; *в* – ПП-Нп-25Х5ФМС

вала можливість їй зміщатися в горизонтальній площині (рухоме закріплення) (рис. 3).

Виконувалося також наплавлення пластин з аналогічним закріпленням, але з зазором до столу. Наплавлення кожної пластини починали з боку жорсткого закріплення і вели до іншого краю без перерв на охолодження. Після наплавлення всієї пластини притисні планки не знімали до повного її охолодження.

На рис. 4 наведено пластини після одношарового наплавлення трьома різними дротами.

При розрахунках наплавлення валиків моделювалось в рамках моделі тіл, що ростуть [1]. В цій моделі використовують неklasичні граничні умови на поверхні наплавлення. Чисельні процедури, необхідні для їх виконання, розглянуті в роботах [2, 3].

Термов'язкопластична поведінка основного металу і наплавлених валиків описується моделлю течії Боднера-Партома [4]. Параметри моделі, а також теплофізичні характеристики конкретизуються з використанням експериментальних даних.

Мікроструктурні перетворення моделюються за допомогою термокінетичних діаграм (ТКД) розпаду переохолодженого аустеніту [5, 6]. Для сталей, що розглядаються, ці діаграми оцифровані для використання в розрахунках.

Математична постановка задачі включає наступні співвідношення:

– рівняння рівноваги і теплопровідності

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad \bar{c}_v \dot{\theta} = \text{div}(\bar{k} \text{grad } \theta) + Q, \quad (1)$$

з тепловими граничними і початковими умовами

$$-k \bar{n} \cdot \text{grad } \theta = -q + \gamma(\theta - \theta_c) + \sigma \varepsilon(\theta^4 - \theta_0^4); \quad \theta = \theta_0 \text{ при } t = 0; \quad (2)$$

– визначальні рівняння

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{\theta ph} + \varepsilon_{ij}^*, \quad \varepsilon_{kk}^p = 0, \quad (3)$$

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - e_{ij}^{\theta ph} + e_{ij}^*), \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^{\theta ph} - \varepsilon_{kk}^*) \quad (4)$$

– рівняння течії

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = D_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(\bar{K}_0 + K)^2}{3J_2} \right]^n \right\} s_{ij} / s_i, \quad \varepsilon_{ij}^p(0) = 0; \quad (5)$$

для основного металу  $\varepsilon_{ij}^*(0) = 0$ ;

– рівняння еволюції для параметра ізотропного зміщення

$$\dot{K} = m_1 (\bar{K}_1 - K) \dot{w}^p, \quad K(0) = 0; \quad (6)$$

де  $G$ ,  $G_f$  та  $K_V$ ,  $K_{Vf}$  – модулі зсуву і об'ємного стиснення; риска зверху означає розрахунок за правилом суміші  $(\dot{\bullet}) = (\bullet)_{\xi} C_{\xi}$ , де  $C_{\xi}$  – об'ємні концентрації фаз,  $\xi = A, F, P, B, M$ , відповідно, аустеніту, фериту, перліту, бейніту і мартенситу;  $K_{\xi 0}$ ,  $K_{\xi 1}$ ,  $m_1$ ,  $n$ ,  $D_0$  – параметри моделі;  $\dot{w}^p$  – пластична потужність;  $s_i$  – другий інваріант тензора напружень;

$\dot{w}^p = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,  $s_i^2 = 1/2 s_{ij} s_{ij}$ ;  $Q$  – джерело тепла;  $\varepsilon_{ij}^*$ ,  $\theta^*$  – деформації і температура елемента  $\Delta v(t^*)$  в момент його нарощування, що забезпечують умови  $\sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}^*, \theta^*) = 0$  в  $\Delta v(t^*)$  в момент нарощування  $t = t^*$ ,  $k$  та  $\bar{c}_v$  – коефіцієнти теплопровідності і об'ємної теплоємності;  $\varepsilon_{ij}^{\theta ph}$  – термофазова деформація.

Механічні граничні умови конкретизуються умовами наплавлення і закріплення елемента.

Задача про термомеханічний стан наплавлених деталей розв'язується чисельно за допомогою методу скінченних елементів [7]. Використовується

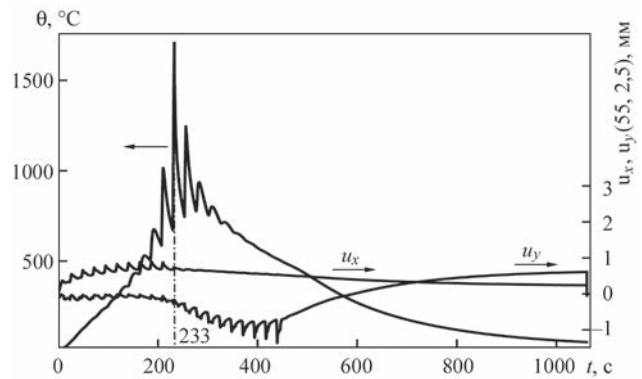


Рис. 5. Температура і переміщення точки основи під 11-м валиком за часом. Наплавлення суцільним дротом Sv-08A

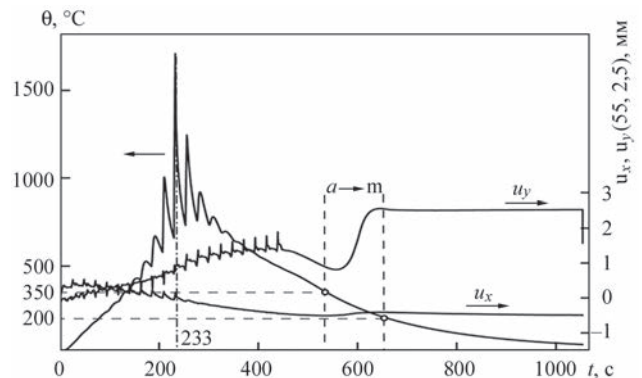


Рис. 6. Температура і переміщення точки основи під 11-м валиком за часом. Наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС



Рис. 7. Схема замірів величини деформації листа після наплавлення

Експериментальні та розрахункові дані по прогинам пластин (мм), які були наплавлені різними дротами в один шар\*

Умови опирання	ПДС/ПНС	Матеріали для наплавлення								
		Св-Х19Н18Г6М3В2			ПП-Нп-25Х5ФМС			Св-08А		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Гладке	ПДС	1,45	1,61	0,7	1,52	1,69	1,7	1,21	1,22	0,7
	ПНС	1,34	1,38		1,93	1,72		1,13	1,12	
З зазором	ПДС	2,77	2,18	2,0	2,81	4,96	2,5	2,84	2,27	1,2
	ПНС	2,66	1,68		2,55	4,22		2,35	1,69	

Примітка. \*Стовпчики під номерами 1 та 2 відповідають розрахунковим даним при одночасному і поваликовому наплавленню, відповідно. Строки ПДС і ПНС відповідають моделям розрахунку. Стовпчики під номером 3 відповідають експериментальним даним. Прогини визначаються після остигання та визволення кромок.

восьмивузловий чотирикутний скінченний елемент. Нестационарні рівняння інтегруються за неявними часовими схемами зі змінним кроком інтегрування. Ітераційні процеси на кожному кроці прискорюються за допомогою процедури Стефенса-Ейткена.

Вплив мартенситного перетворення на кінетику температури та переміщень за умов наплавлення із зазором між пластиною та опорою ілюструється в точці в основному матеріалі під 11-м валиком, який наплавляється в момент часу  $t_{11} = 2,33$  с. Такі криві наведено на рис. 5 для наплавлення дротом Св-08А і на рис. 6 для випадку наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС.

У другому випадку має місце суттєве збільшення прогину в області мартенситного перетворення. Точками на температурній кривій на рис. 6 позначені моменти входу в область перетворення аустеніт-мартенсит і виходу з неї. Штрихові прямі обмежують цю область на осях  $\theta$  та  $t$ . Миттєва зміна прогину при  $t \approx 1100$  с відповідає звільненню правої кромки пластини від гладкого закріплення.

Експериментально характерні прогини наплавлених пластин визначались наступним чином. Після остигання та звільнення закріплених кромок зразок клався на гладку плиту та вимірювалися індикатором нормальні зміщення верхньої поверхні пластини від плити. За характерний прогин приймалося максимальне локальне значення визначеного вище прогину в перерізі наплавленої частини пластини (рис. 7). При такому визначенні характерний прогин завжди додатний.

Для трьох дротів Св-Х19Н18Г6М3В2, ПП-Нп-25Х5ФМС і Св-08А експериментальні та розрахункові дані для характерних прогинів при одношаровому наплавленні за умов гладкого опирання наведено в таблиці.

Як видно з даних, наведених у таблиці, модель ПДС прогнозує більші прогини порівняно з моделлю ПНС, за виключенням матеріалів з мартенситними перетвореннями (25Х5ФМС). При наплавленні матеріалів з мартенситними перетвореннями мають місце більші прогини за рахунок об'ємних ефектів перетворення. Необхідно також відзначити, що при наплавленні з зазором між пластиною і зварювальним столом спостеріга-

ються значно більш великі деформації, ніж в разі щільного притиснення пластини до столу.

Аналогічні розрахунки були проведені для випадку двошарового наплавлення. Зокрема при розрахунку двошарового наплавлення суцільним дротом Св-08А отримано такі результати щодо прогинів за умов гладкого опирання: схеми без перекриття валиків (рис. 2, а) – для моделі ПДС – 1,02 мм, ПНС – 0,91 мм. Схема послідовного одночасного наплавлення шарів дає такі значення прогинів: за моделлю ПДС – 1,00 мм, ПНС – 0,91 мм. Експериментальне значення прогину 0,8 мм. Результати розрахунку прогинів для випадку наплавлення валиків з перекриттям і без перекриття співпадають з розбіжністю менше ніж 10 %.

Розбіжність наведених розрахункових та експериментальних результатів визначається, з одного боку неточністю математичної моделі щодо неврахування контактної взаємодії пластини з поверхнею опору, з іншого боку – технічними труднощами в забезпеченні при експериментальних дослідженнях всіх умов закріплення кромок пластин.

## Висновки

1. Удосконалена чисельна кінцево-елементна методика розрахунку поточного і залишкового напружено-деформованого і мікроструктурного стану тонких наплавлених пластин з метою врахування умов їх закріплення в процесі наплавлення.

2. Проведено розрахунки НДС, мікроструктурного стану і формозміни пластин при наплавленні за умов гладкого опирання. Встановлено, що ці умови забезпечують менший залишковий прогин порівняно з умовами вільної границі на нижній поверхні елемента. Оцінено вплив умов закріплення елементів на максимальні значення залишкових прогинів, а також ефекту мікроструктурних перетворень в наплавленому металі.

3. Модель ПДС прогнозує більші прогини порівняно з моделлю ПНС, за виключенням матеріалів з мартенситними перетвореннями (25Х5ФМС). При наплавленні матеріалів з мартенситними перетвореннями мають місце більші прогини за рахунок об'ємних ефектів перетворення.

4. За винятком наплавлювального металу з мартенситними перетвореннями (25X5ФМС) модель одночасного наплавлення шару прогнозує більший прогин порівняно з моделлю поваликового наплавлення і може використовуватися для оцінки верхньої границі прогину.

5. Результати розрахунків задовільно корелюються з експериментальними даними.

### Список літератури

1. Сенченков И.К. (2005) Термомеханическая модель растущих цилиндрических тел из физически нелинейных материалов. *Прикл. механика*, 41, 9, 118–126.
2. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. Гливице, Изд-во Силезкого политехнического института, 44–100.
3. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Київ, Екотехнологія.
4. Bodner S.R. (2000) *Unified plasticity – an engineering approach*. Final Rep. Technion. Israel Inst. of Tech., Haifa.
5. Попов А.А., Попов А.Е. (1961) *Изотермические и термомеханические диаграммы распада переохлажденного аустенита*. Справочник термиста. Москва-Свердловск, ГНТИ Машлит.

6. Шоршоров М.Х., Белов В.В. (1972) *Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке*. Атлас. Москва, Наука.
7. Мотовиловец И.А., Козлов В.И. (1987) *Механика связанных полей в материалах и элементах конструкций в 5-ти т. Т.1. Термоупругость*. Киев, Наукова. думка.

### References

1. Senchenkov, I.K. (2005) Thermomechanical model of growing of cylindrical bodies from nonlinear materials. *Prkl. Mekhanika*, 41(9), 118-126 [in Russian].
2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, E.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling*. Gliwice, Silesia Polytechn. In-te, 44–100 [in Polish].
3. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
4. Bodner, S.R. (2000) *Unified plasticity – an engineering approach*. Final Rep. Technion. Israel Inst. of Tech., Haifa.
5. Popov, A.A., Popov, A.E. (1961) *Isothermal and thermokinetic diagrams of overcooled austenite decomposition: Refer. book of heat-treater*. Moscow-Sverdlovsk. GNTI Mashlit [in Russian].
6. Shorshorov, M.Kh., Belov, V.V. (1972) *Phase transformations and change of steel properties in welding: Atlas*. Moscow, Nauka [in Russian].
7. Motovilovets, I.A., Kozlov, V.I. (1987) *Mechanics of related fields in materials and structure elements. In: 5 Vol., Vol. 1: Thermoelasticity*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## CALCULATION OF RESIDUAL STRESS-STRAIN STATE OF DEPOSITED STEEL THIN-SHEET PLATES

I.K. Senchenkov<sup>1</sup>, I.O. Ryabtsev<sup>2</sup>, O.P. Chervinko<sup>1</sup>, A.A. Babinets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine. 3 Nesterov Str., 02000, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Finite-element calculation procedure was developed and stress-strain and microstructural state was studied at single- and two-layer surfacing of 3 mm plates from St3 steel by Sv-Kh19N18G6M3V2, PP-Np-25Kh5FMS and Sv-08A wires. Calculations of SSS, microstructural state and shape change of the plates at surfacing under the smooth support conditions were performed. The model of plane-deformed state (PDS) predicts greater deflections, compared to the model of plane-stressed state (PSS), except for materials with martensite transformations (PP-Np-25Kh5FMS). At surfacing materials with martensite transformations, greater deflections are in place due to volumetric effects of transformation. Except for deposited metal with martensite transformations (25Kh5FMS), the model of simultaneous deposition of a layer predicts greater sagging, compared to that of bead-by-bead deposition and it can be used for assessment of upper deflection limit. Satisfactory correlation was obtained for computational and experimental data on surfaced plate deflection. Rational schemes of supporting and fastening the element edges were determined, which provide minimum residual deflections. 7 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

**Keywords:** arc surfacing, stress-strain state, surfaced plate deformations, Bodner-Partom model, deflection calculation procedure

Надійшла до редакції 19.04.2021



Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
 Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція  
**ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ**  
**ТА ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ**  
 6 – 11 вересня 2021 р.  
 Україна, Одеса

Голова програмного комітету  
 академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

- Лазерне та електронно-променеве зварювання, різання, наплавлення, термообробка, нанесення покриттів
- Електронно-променева плавка та рафінування
- Гібридні процеси
- 3D технології
- Моделювання променевих технологій
- Неруйнівний контроль
- Матеріалознавчі проблеми лазерних та електронно-променевих технологій

ОБЛАДНАННЯ ♦ ТЕХНОЛОГІЇ ♦ МОДЕЛЮВАННЯ



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ  
 Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11  
 Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
 Тел./факс: (38044) 200-82-77  
 E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021>



Національна академія наук України  
 Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона  
 Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
 Міжнародна Асоціація «Зварювання»

II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ**  
**ТА**  
**МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

6–10 вересня 2021  
 Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор  
 ПрАТ «УкрНДІНКС»



Офіційний спонсор  
 ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ  
 Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
 вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
 тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50  
[journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[posypaiko.yurii@gmail.com](mailto:posypaiko.yurii@gmail.com)  
<http://pwi-scientists.com/ukr/nkt2021>