

І. К. Сенченков, О. П. Червінко, Н. Д. Яковенко

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЛИСТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ОДНО- І ДВОШАРОВОМУ НАРОЩУВАННІ

*Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ,
вул. Нестерова, 3, 03057, Київ, Україна; e-mail: term@inmech.kiev.ua*

Abstract. The residual stress-strain state of sheet elements during one- and two-layer building up with two different steels under two support conditions are investigated. The mathematical model of the process is based on the theory of growing bodies, the unified Bodner-Partom model of viscoplastic flow, as well as the thermokinetic diagrams for microstructural transformations during cooling. The numerical modeling of the surfacing process is carried out using the finite element technique. An influence of the microstructural transformations and support conditions on the residual stress-strain state of deposited sheet elements is revealed. The comparison of results for the plain strain and plain stress models is carried out.

Key words: sheet element, multilayered surfacing, residual stress-strain state, microstructural transformation, growing body, unified model of viscoplasticity.

Вступ.

Наплавлення є найбільш поширеним способом нарощування і, зокрема, базовою технологією 3D-друку металевих та термопластичних елементів конструкцій.

Наплавлені листові елементи конструкцій широко використовуються в машинобудуванні, гірничій промисловості, будівництві, енергетиці тощо.

Оскільки для листових елементів товщина наплавлених шарів сумірна із товщиною елемента, важливим функціональним аспектом є розрахунок залишкових прогинів. Методика їх розрахунку викладена в роботі [9]. Вона базується на концепції нарощування тіл [1, 8, 17], в поєднанні з уніфікованою моделлю течії Боднера – Партома [12, 18] та термокінетичними діаграмами розпаду переохолодженого аустеніту для визначення мікроструктурних перетворень в сталях [5, 10, 14]. Огляд літератури стосовно складових методики наданий в роботі [9].

Між тим аналіз напружено-деформованого стану (НДС) наплавлених деталей є базовим при оцінці їх довговічності в процесі експлуатації [3, 7]. З огляду літератури впливає, що задачі розрахунку НДС досліджено недостатньо.

В даній роботі розглядаються результати моделювання НДС при нарощуванні прямокутних в перерізі призматичних листових елементів зі сталі Ст3сп одним та двома шарами рідкого металу зі сталей Св-08А і 25Х5ФМС [9].

Задача розв'язується методом скінченних елементів [4, 19].

§1. Об'єкт дослідження.

Розглядається листовий (пластинчастий) елемент зі сталі Ст3сп прямокутного перерізу в площині *Oxy*. Форма і позначення розмірів пластини і наплавлених валиків показані на рис. 1.

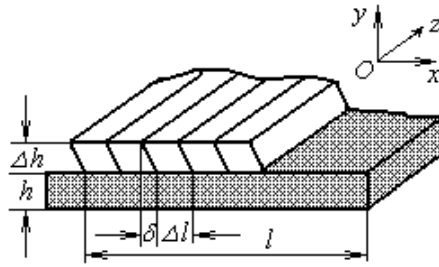


Рис. 1

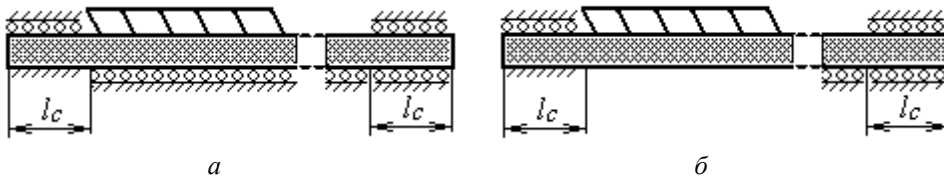


Рис. 2

На рис. 2, а, б наведена схема гладкого опирання та опирання із зазором (вільне опирання) між пластиною і основою та закріплення по бічних кромках на довжині l_c .

Для зведення тривимірної задачі до двовимірної застосовується схема одночасного (миттєвого) нарощування валика в напрямку Oz . У цьому випадку отримуємо задачу про плоский деформований (ПДС) або плоский напружений (ПНС) стани в площині Oxy в залежності від умов закріплення торців $z = 0$ і $z = l_z$.

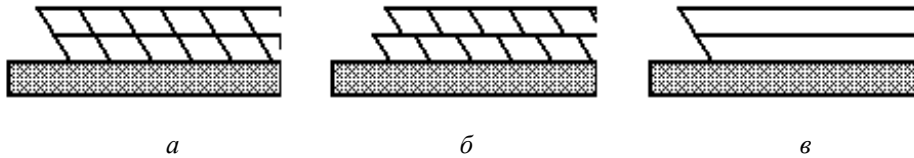


Рис. 3

При двошаровому наплавленні розглядаються схеми нарощування валиків без зміщення (рис. 3, а) і зі зміщенням (рис. 3, б), а також спрощена схема послідовного миттєвого нарощування першого, а потім другого шарів (рис. 3, в).

§2. Постановка задачі.

Постановка задачі включає наступні співвідношення:

– рівняння рівноваги та теплопровідності

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \bar{c}_v \dot{\theta} = (\bar{k} \theta_{,i})_{,i} + Q \quad (2.1)$$

з граничними і початковими умовами

$$-\bar{k} n_i \theta_{,i} = -q + \gamma(\theta - \theta_C) + \sigma \varepsilon (\theta^4 - \theta_0^4); \quad \theta(0) = \theta_0;$$

– визначальні рівняння

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{\theta ph} + \varepsilon_{ij}^*; \quad \varepsilon_{kk}^p = 0; \\ s_{ij} &= 2G(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - e_{ij}^{\theta ph} - e_{ij}^*); \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^{\theta ph} - \varepsilon_{kk}^*); \end{aligned} \quad (2.2)$$

– рівняння течії моделі Боднера – Партома

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = D_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(\bar{K}_0 + K)^2}{3s_i} \right]^n \right\} s_{ij}/s_i, \quad \varepsilon_{ij}^p(0) = 0 \quad (2.3)$$

для основного металу $\varepsilon_{ij}^* \equiv 0$;

– рівняння еволюції для параметра ізотропного зміцнення

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

де G , G_f і K_V , K_{Vf} – модулі зсуву і об'ємного стиску; K_0 , K_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.

Механічні граничні умови конкретизуються умовами наплавлення і закріплення елемента.

Термомеханічні властивості кожної фази Y_ξ розраховуються з урахуванням залежності від температури $Y_\xi = Y_\xi(\theta)$. Для розрахунку макрохарактеристики \bar{Y} для довільного фазового складу використовується лінійне правило сумішей. Загальна формула записується у вигляді

$$\bar{Y}(\theta, t) = C_\xi(\theta, t) Y_\xi(\theta). \quad (2.4)$$

Фізичними величинами, розрахованими за правилом сумішей, є: c_V – теплоємність; k – теплопровідність; E – модуль Юнга; α – коефіцієнт лінійного термічного розширення; ν – коефіцієнт Пуассона, а також параметри моделі течії. Усереднені значення \bar{K}_0 та \bar{K}_1 обчислюються з використанням даних, наведених в роботі [10].

В рівнянні (2.1) і далі проводиться підсумовування по повторюваному індексу. У широкому інтервалі температур правило сумішей використовується і узгоджується з експериментами в роботах [13, 15, 16].

Деформації ε_{ij}^* обчислюються за умов відсутності напружень в елементі Δv матеріалу, що нарощується в момент $t = t^*$ [7, 19].

Термофазова деформація $\varepsilon_{ij}^{\theta ph}$ визначається через питомі об'єми фаз V_ξ за формулою

$$\varepsilon_{ij}^{\theta ph}(\theta, \theta_r, C_\xi) = \frac{V_\xi(\theta) C_\xi(\theta) - V_\xi(\theta_r) C_\xi(\theta_r)}{3V_\xi(\theta_r) C_\xi(\theta_r)} \delta_{ij}. \quad (2.5)$$

Тут θ – поточна температура; θ_r – відлікова температура.

Температурні залежності питомих об'ємів $V_\xi(\theta)$ для фази ξ в м³/кг, віднесені до $\theta_r = 20^\circ\text{C}$, приймаються у вигляді [11]

$$V_\xi(\theta) = V_{\xi 0} [1 + 3\alpha_\xi (\theta - \theta_r)],$$

де α_ξ – коефіцієнт лінійного теплового розширення фази ξ ; $V_{\xi 0}$ – питомий об'єм фази ξ при відліковій температурі.

Закон накопичення нової фази ξ ($\xi = F, P, B, M$) у відповідних областях уздовж траєкторії охолодження визначається феноменологічним рівнянням Коїстінена – Марбурґера [14]

$$p_\xi = \left[1 - \exp \left(-k \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_e} \right) \right] p_{\xi e},$$

де θ_s, θ_e – температури початку і кінця перетворення; k – матеріальна константа, $p_\xi = C_\xi \cdot 100\%$; $p_{\xi e}$ – максимальне значення нової фази для даної траєкторії; C_ξ – об’ємна частка фази, $0 \leq C_\xi \leq 1$, $\sum_{\xi} C_\xi = 1$.

§3. Модель процесу наплавлення.

Нарощування валиків моделювалося за схемою, наведеною на рис. 2. Розрахункова модель наведена на рис. 4.

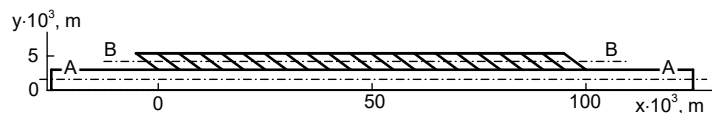


Рис. 4

Валик і прилеглі до нього смужки матеріалу попередньо розігріваються протягом часу $t_Q = 9$ с об’ємними джерелами. Їх потужність відповідає ентальпії розплаву, який в нього вкладається, а також розігріву електричною дугою і забезпечує розігрів до $\theta \approx 1550^\circ \text{C}$ [6, 7]. В момент досягнення цього рівня температури фіксується фактична температура θ^* і деформація ε_{ij}^* порожніх елементів валика. Далі вони заповнюються матеріалом наплавки, механічні властивості якого описуються рівняннями (2.1) – (2.5).

Після охолодження протягом часу $t_o = 23$ с наплавочні цикли повторюються до закінчення процесу наплавлення визначеної ділянки листового елемента. Всього нарощується 20 валиків. Після вистигання елемент звільняється від закріплень, показаних на рис. 2, і визначається його залишковий НДС. Прийнято $l = 100$ мм, $h = 3$ мм, $\Delta h = 2,3$ мм, $l_z = 200$ мм, $\Delta l = 5$ мм, $l_c = 25$ мм. Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні пластини ($y \geq h$) приймався рівним $\gamma = 30 \text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$, а з поверхні основи ($y = 0$) – $\gamma = 100 \text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

§4. Чисельна методика розв’язування задачі.

Задача розв’язується за методикою, розвинутою в роботах [4, 6, 7, 19]. Рівняння з похідними за часом інтегруються з використанням неявної схеми зі змінним кроком інтегрування. Нелінійна крайова задача термомеханіки на кожному часовому кроці розв’язується методом простої ітерації з прискоренням збіжності за процедурою Стефенса – Ейткена. Лінеаризована задача на кожній ітерації розв’язується методом скінченних елементів з використанням чотирикутного ізопараметричного елемента.

§5. Результати розрахунків.

Розглянемо одношарове наплавлення. Вивчимо вплив умов опирання на НДС в умовах НДС при напавленні сталю Св-08А. На рис. 5, а, б наведені розподіли залишкових напружень σ_{xx} , σ_{zz} , інтенсивності напружень s_i у випадку опирання із зазором (рис. 2, б).

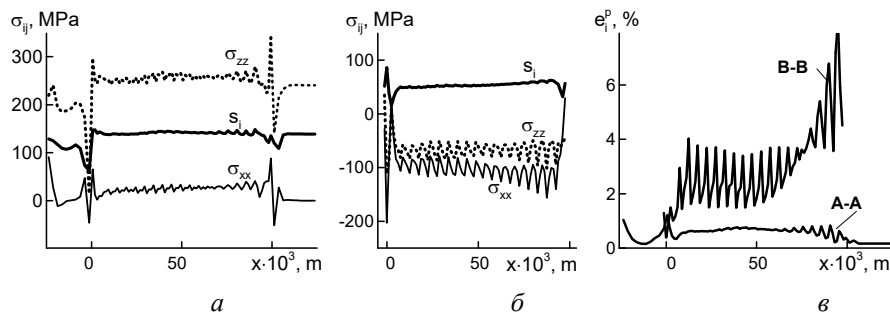


Рис. 5

Рис. 5, *a* відповідає перерізу А – А, а рис. 5, *б* – перерізу В – В (рис. 4). На рис. 5, *в* наведено розподіли інтенсивності пластичних деформацій e_i^p , $e_i^p = (2e_{ij}^p e_{ij}^p / 3)^{1/2}$.

Аналогічні результати для умов гладкого опирання наведені на рис. 6, *a* – *в*.

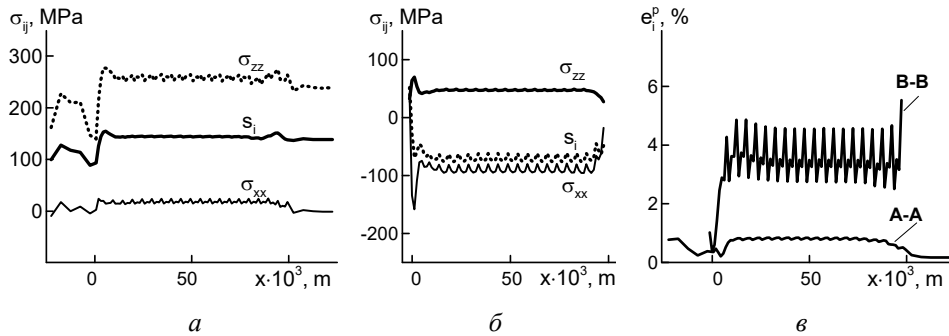


Рис. 6

Видно, що рівні НДС несуттєво відрізняються від випадку опирання із зазором, за винятком зростання пластичних деформацій в останніх валиках при наплавленні із зазором (рис. 5, *б*). Найбільшими є розтягувальні напруження σ_{zz} .

Розподіли напружень по товщині в перерізі D – D (рис. 7, *a*) для умов гладкого опирання приведено на рис. 7, *б*, *в*. Цифри на рис. 7, *a* вказують номери наплавлених валиків.

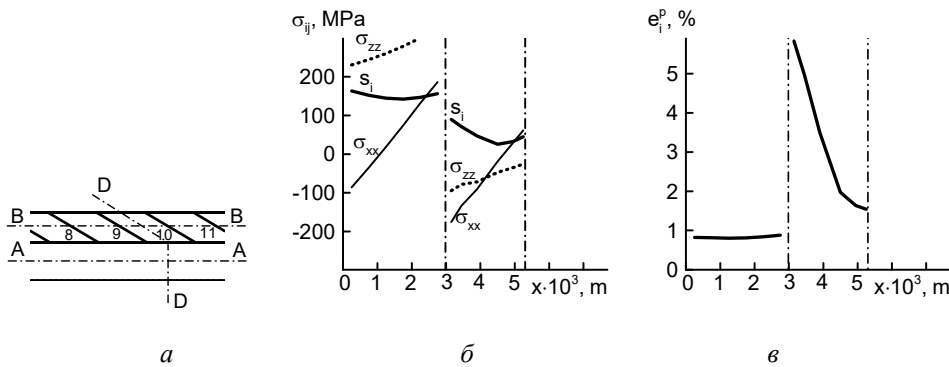


Рис. 7

Найбільш напруженим є основний метал, а найбільш пластично-деформованим – нарощений шар поблизу границі з основним металом. Розподіли для наплавлення із зазором відрізняються несуттєво.

Розглянемо вплив матеріалу наплавки на прикладі моделі ПНС і гладкого опирання.

Залишкові розподіли параметрів s_i і e_i^p в перерізах А – А і В – В для наплавлення сталями Св-08А і 25Х5ФМС наведені на рис. 8, *a*, *б* і рис. 9, *a*, *б*, відповідно.

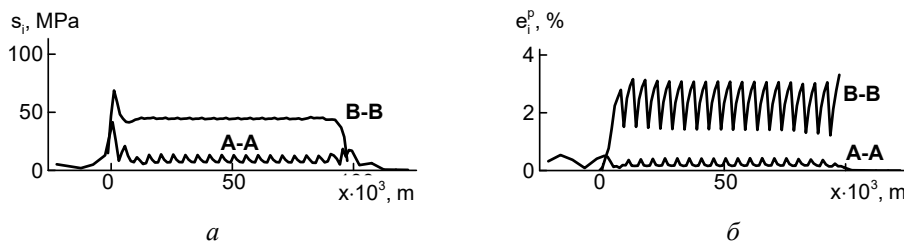


Рис. 8

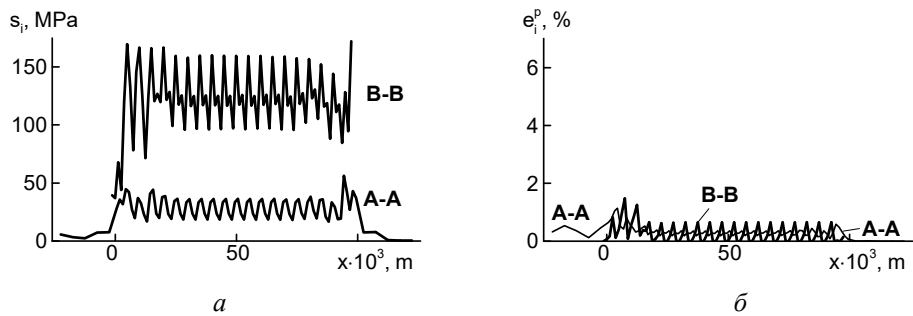


Рис. 9

Порівнюючи напруження, відмітимо, що їх рівень при наплавленні сталлю Св-08А (рис. 8, а) суттєво нижчий, ніж при наплавленні сталлю 25Х5ФМС (рис. 9, а) внаслідок її зміцнення після мартенситних перетворень. Відповідно і пластичні деформації в мартенситній фазі наплавленого шару (рис. 9, б) значно менші, ніж в шарі сталі Св-08А. При цьому напруження в шарі сталі 25Х5ФМС більші, ніж напруження в основному металі (рис. 9, а), а пластичні деформації співмірні (рис. 9, б).

Викладені вище результати підтверджуються порівнянням розподілів в перерізі D – D напружень σ_{xx} , інтенсивності s_i і деформацій e_i^p , наведених на рис. 10, а, б і рис. 11, а, б для сталей Св-08А і 25Х5ФМС, відповідно.

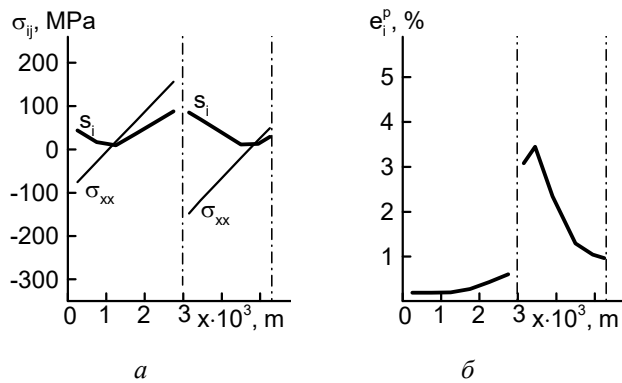


Рис. 10

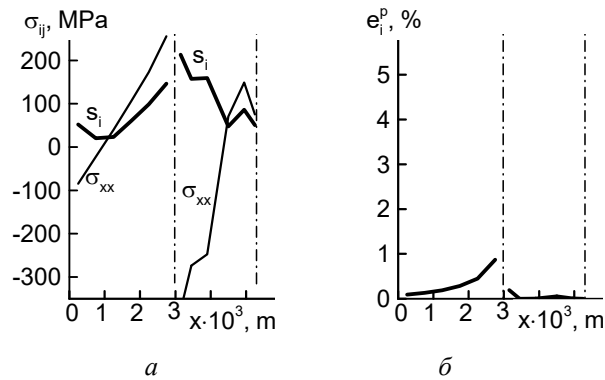


Рис. 11

Порівняємо результати, отримані в рамках гіпотез ПДС і ПНС на прикладі наплавлення сталлю 25Х5ФМС за умов гладкого опирання. Відповідні розподіли характеристик НДС для ПДС і ПНС наведені на рис. 12, *а*, *б* та рис. 9, *а*, *б*, відповідно.

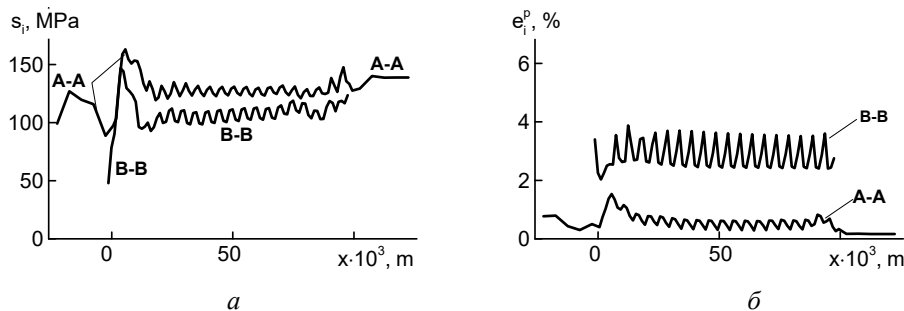


Рис. 12

Модель ПДС прогнозує приблизно однаковий рівень напружень в наплавленому шарі та основному металі (рис. 12, *а*) і значно вищий рівень пластичних деформацій в наплавленому шарі (рис. 12, *б*).

Модель ПНС прогнозує значно вищі напруження в наплавленому шарі порівняно з основним металом (рис. 9, *а*) і суттєво вищі пластичні деформації в наплавленому шарі (рис. 12, *б*). При цьому обидві моделі показують близькі рівні пластичних деформацій в основному металі.

З наведених результатів випливає, що умови закріплення кромки пластини $z = 0$ і $z = l_z$ досить суттєво впливають на залишковий НДС нарощеного елемента.

Розглянемо випадок двошарового нарощування сталлю Св-08А за умов гладкого опирання. Другий шар наплавляється за умов вистигання першого шару до $\theta = 300^\circ \text{C}$.

Результати розрахунків залишкового НДС за умов ПДС для двошарового наплавлення сталлю Св-08А (схема на рис. 13) наведені на рис. 14, *а* – *в*. Рис. 14, *а* відповідає перерізу А – А, а рис. 14, *б* – перерізу В – В. Результати для випадку перекриття валиків (рис. 3, *б*) відрізняються несуттєво. Максимальні напруження розтягу σ_{zz} досягаються в основному металі (переріз А – А), а максимальні напруження стиску σ_{xx} формуються в першому шарі (переріз С – С) в околі границі з основним металом. В цьому перерізі мають місце максимальні значення інтенсивностей залишкових пластичних деформацій, які мають коливальний характер з періодом Δl (рис. 14, *в*).

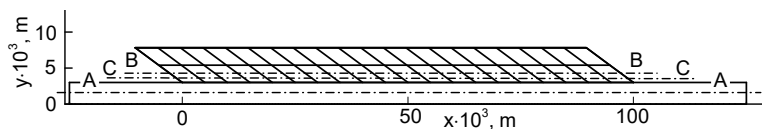


Рис. 13

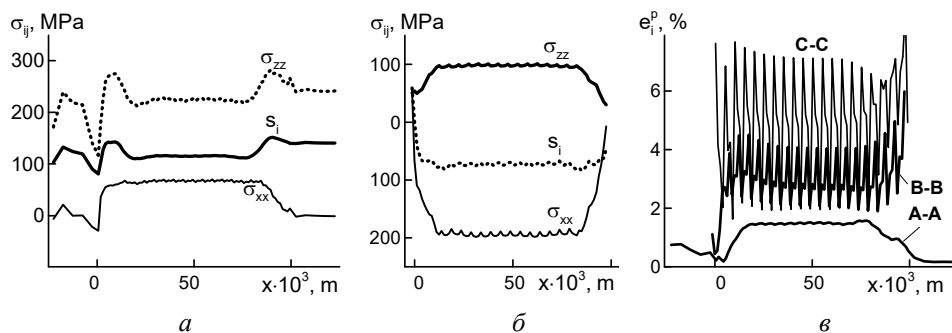


Рис. 14

Розподіл напружень і інтенсивності пластичних деформацій вздовж осі Oy в середньому перерізі $D - D$ в 10-му валику (рис. 15, *a*) показаний на рис. 15, *б, в*. Має місце розрив значень НДС при переході з основного металу до металу наплавки. Розрив обумовлений різними властивостями металів і умовами нанесення шарів. При цьому розрив на границі шарів практично відсутній.

Вплив закріплення пластини на кромках, перпендикулярних осі Oz , ілюструється порівнянням наведених результатів з аналогічними результатами за умов ПНС (рис. 16, 17). Порівнюючи з даними на рис. 14, 15, бачимо, що за умов ПНС маємо суттєво нижчий рівень напружень і пластичних деформацій в основному металі, порівняно з ПДС, і майже однаковий рівень напружень в наплавленому металі.

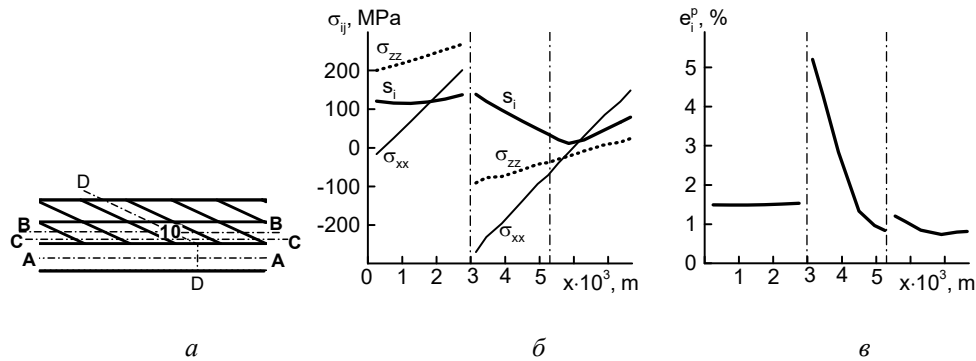


Рис. 15

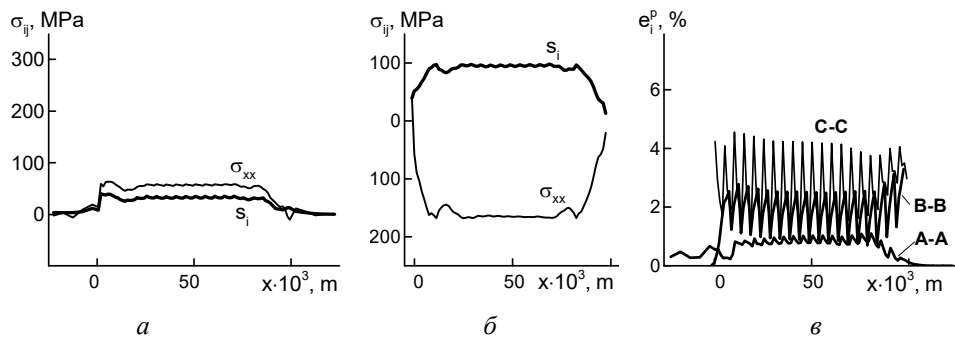


Рис. 16

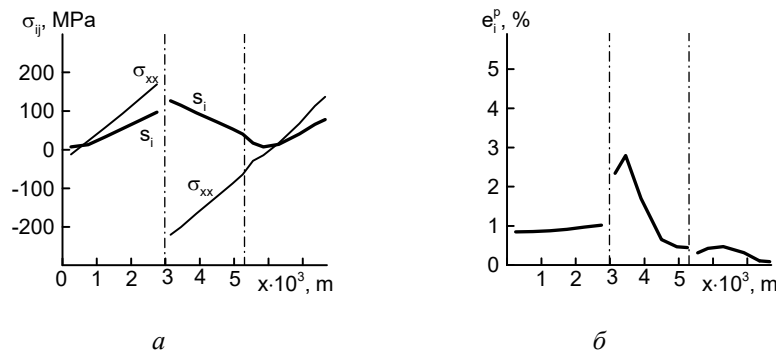


Рис. 17

Співставлення результатів за умов ПДС і ПНС показує, що напруження в площині Oxy відрізняються несуттєво. Однак, пластичні деформації у випадку ПНС внаслідок відсутності компоненти σ_{zz} значно менші, ніж за умов ПДС.

Можливості спрощеної схеми послідовного миттєвого нарощування першого і другого шарів металу за умов ПДС ілюструються на рис. 18.

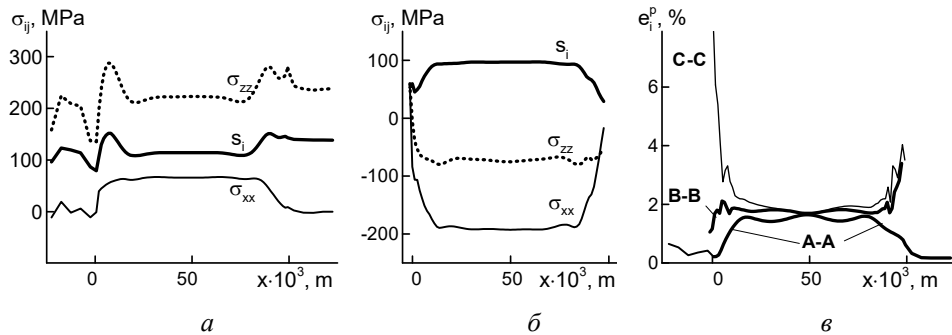


Рис. 18

Порівняння з даними на рис. 14 показує, що за напруженнями результати добре узгоджуються. Але розподіл і рівень пластичних деформацій суттєво відрізняються, як кількісно, так і якісно. Наближена схема, за виключенням крайових зон, прогнозує значно менші пластичні деформації в наплавленому металі.

Висновки.

Проведено розрахунки залишкового НДС прямокутних листових елементів зі сталі СтЗсп при одно- і двошаровому нарощуванні сталями Св-08А і 25Х5ФМС за умов гладкого опирання та опирання із зазором на нижній поверхні елементу.

Для випадку одношарового наплавлення сталлю Св-08А в рамках моделі плоского деформованого стану в обох випадках опирання напруження відрізняються несуттєво. Домінуючими є поздовжні напруження. При цьому пластичні деформації в нарощеному шарі значно вищі, ніж в елементі. Найбільші напруження і деформації формуються в околі границі елемент – наплавлений шар.

За умов гладкого опирання і гіпотези ПНС при наплавленні сталлю 25Х5ФМС внаслідок зміцнення при мартенситному перетворенні має місце значно вищий рівень залишкових напружень в елементі і нарощеному шарі, але нижчий рівень пластичних деформацій в наплавці.

Модель ПДС прогнозує приблизно однаковий рівень напружень в елементі і шарі, а модель ПНС показує близькі напруження в шарі, але суттєво нижчі напруження в елементі. Модель ПНС показує суттєво нижчі значення пластичних деформацій, особливо в нарощеному шарі. Таким чином, умови закріплення елементу на границях $z = 0$ і $z = l_z$ суттєво впливають на залишковий НДС наплавленого елементу. Отримані результати можна розглядати як граничні оцінки характеристик НДС.

Встановлено, що при двошаровому нарощуванні результати для випадків з перекриттям валиків і без перекриття відрізняються несуттєво.

Для випадку наплавлення сталі Св-08А в умовах ПДС максимальними розтягувальними напруженнями є поздовжні напруження в основі, а максимальні пластичні деформації мають місце в першому шарі поблизу границі з основою.

Співставлення результатів за умов ПДС і ПНС показує, що напруження в площині Oxy відрізняються несуттєво. Однак, пластичні деформації у випадку ПНС значно менші, ніж за умов ПДС.

Аналіз спрощеної схеми послідовного миттєвого нарощування першого і другого шарів наплавки показує, що за напруженнями результати добре узгоджуються на ділянці наплавлення. Але розподіли пластичних деформацій суттєво відрізняються як кількісно, так і якісно. Наближена схема прогнозує значно менші деформації в нарощеному шарі.

Наукові дослідження, результати яких опубліковано у цій статті, виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка пріоритетних напрямків наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

РЕЗЮМЕ. Досліджено залишковий напружено-деформований стан листових елементів при одно- і двошаровому наплавленні двома сталями за двох умов опирання. Математична модель процесу базується на теорії нарощуваних тіл, уніфікованій моделі в'язкопластичної течії Боднера-Партома, а також термокінетичних діаграмах для розрахунку мікроструктурних перетворень при охолодженні. Чисельне моделювання процесу наплавлення проводилось з використанням скінченно-елементної методики. Виявлено суттєвий вплив мікроструктурних перетворень і умов опирання на залишковий напружено-деформований стан наплавлених листових елементів. Дано порівняння моделей плоского деформованого і напруженого станів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: листовий елемент, багатошарове наплавлення, нарощуване тіло, поточний та залишковий напружено-деформований стан, мікроструктурне перетворення, уніфікована модель в'язкопластичності.

1. Арутюнян Н.Х., Дроздов А.Д., Наумов В.Э. Механика растущих вязкоупругопластических тел. – Москва: Наука, 1987. – 472 с.
2. Марочник сталей и сплавов. 2-е издание доп. и исп. (Под ред. А.С.Зубченко). – Москва.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 619 с.
4. Мотовиловец И.А., Козлов В.И. Механика связанных полей в материалах и элементах конструкций: в 5-ти томах. Т.1. Термоупругость. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 264 с.
5. Попов А.А., Попова А.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Справочник термиста. – Москва – Свердловск: ГНТИ Машлит, 1961. – 430 с.
6. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. – Киев: Екотехнологія, 2013. – 400 с.
7. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование. – Гливице: Изд-во Силезского политехнического ин-та, 2015. – 590 с.
8. Сенченков И.К., Лобанов Л.М., Червинко О.П., Пащин Н.А. Закономерности относительных продольных смещений пластин при стыковой электросварке // Доп. НАНУ. – 1998. – № 6. – С. 66 – 70.
9. Сенченков И.К., Рябцев И.О., Червинко О.П., Бабинець А.А. Розрахунок прогинів при нарощуванні листових елементів рідким металом // Прикл. механіка. – 2022. – 58, № 5. – С. 97 – 108.
10. Шоршоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. Атлас. – Москва: Наука, 1972. – 220 с.
11. Юрьев С.Ф. Удельные объемы фаз в мартенситном превращении аустенита. – Москва: Металлургиздат, 1950. – 48 с.
12. Bodner S.R. Unified Plasticity – an Engineering Approach. Final Rep. Technion. – Haifa: Israel Inst. of Tech., Haifa, 2000. – 106 p.
13. Klingbeil N.W., Beuth J.L., Chin R.K., Amon C.H. Residual Stress-Induced Warping in Direct Metal Solid Freeform Fabrication // Internet / J. of Mech. Sci. – 2002. – 44, N 1. – P. 57 – 77.
14. Koistinen D., Marburger R. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure-carbon alloys and plain carbon steels // Acta Metallica. – 1959. – 7. – P. 59 – 60.
15. Lindgren L.E. Computational Welding Mechanics. – Thermomechanical and Microstructural Simulations. – Cambridge: CRC Press, 2007. – 222 p.
16. Radaj D. Welding Residual Stresses and Distortion. Calculation and Measurement. – Dusseldorf: DVs Verlag GmbH, 2003. – 396 p.
17. Senchenkov I.K. Thermomechanical Model of Growing Cylindrical Bodies Made of Physically Nonlinear Materials // Int. Appl. Mech. – 2005. – 41, N 9. – P. 1059 – 1065.
18. Senchenkov I.K., Tabieva G.A. Determination of the Parameters of the Bodner-Partom Model for Thermoplastic Deformation of Materials // Int. Appl. Mech. – 1996. – 32, N 2. – P. 132 – 139.
19. Senchenkov I.K., Tabieva G.A., Ryabtsev I.A., Turyk E. Calculation of residual stresses in multilayer helical surfacing of cylindrical components on the base of the theory of growth of viscoplastic solids // Welding International. – 2006. – 20, N 2. – P. 150 – 156.

Надійшла 30.11.2021

Затверджена до друку 19.07.2022