DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.6
УДК 621.791.92
І.В. Бельмас, д.т.н., професор, belmas09@meta.ua
В.В. Перемітько, д.т.н., професор, vperemitko1965@gmail.com
Г.І. Танцура, к.т.н., доцент
О.І. Білоус, к.т.н., доцент
І.В. Коломоєць, PhD, ст. викладач
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВПЛИВ ШАРУ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО ІЗ ЛОКАЛЬНИМ ВНЕСЕННЯМ ЗМІЦНЮВАЧА, НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛАСТИНИ

Шляхом використання залежностей показників напружено-деформованого стану від однієї функції напружень сформовано математичну модель наплавленої пластини як двошарової конструкції. Побудовано алгоритм визначення деформацій та розподілу напружень у пластині за умови плоского її деформування за напрямком здійснення наплавлення. Враховано періодичну зміну модуля пружності наплавленого шару. Визначено показники напружено-деформованого стану пластини від нормального її навантаження. Показано вплив коефіцієнта Пуассона на пошаровий розподіл напружень у пластині.

***Ключові слова**: пластина; наплавлений шар; двошарова конструкція; механічні властивості матеріалу; напруження; переміщення; функція напружень.*

By using the dependences of the stress-strain state indicators on one stress function, a mathematical model of the welded plate as a two-layer structure was formed. An algorithm for determining the deformations and distribution of stresses in the plate under the condition of its flat deformation in the direction of surfacing is constructed. The periodic change of the modulus of elasticity of the deposited layer is taken into account. The indicators of the stress-strain state of the plate from its normal load were determined. The effect of Poisson's ratio on the layer-by-layer distribution of stresses in the plate is shown.

***Keywords**: plate; deposited layer; two-layer structure; mechanical properties of the material; stress; displacement; stress function.*

Постановка проблеми

Наплавлення — як відновне, так і зміцнювальне, на етапі виготовлення заготівок та виробів з них — здійснюється з використанням матеріалів, які зумовлюють формування шарів металу, що суттєво відрізняються за фізико-механічними властивостями від основи. Враховуючи також те, що локальна дія концентрованого джерела теплоти спричиняє нерівномірний нагрів заготівки по товщині, а кристалізація наплавленого шару супроводжується ливарною усадкою та структурними перетвореннями, напружено-деформований стан таких об'єктів буде досить несприятливим як з точки зору формоутворення, так і наступної експлуатації готових виробів [1, 2]. Відомості про рівень очікуваних напружень є важливою інформацією при призначенні додаткової обробки наплавлених пластин для підвищення ресурсу їх експлуатації та попередження руйнування.

Особливою та актуальною для розгляду виступає схема нанесення наплавленого шару, матрицю якого складає сплав, наближений за складом та властивостями до основи, з локальним внесенням зміцнювача та формуванням, внаслідок цього, зон підвищеної твердості та зменшеної пластичності у вигляді стрічок, орієнтованих згідно напрямку наплавлення [3]. Така конструкція наплавленого шару, як очікується, повинна сприяти збільшенню довговічності деталей завдяки опірності втомним пошкодженням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Накопичено значний досвід визначення напружено-деформованого та структурного стану деталі після її відновного наплавлення та оцінки на основі цих розрахунків ресурсу наступної безпечної експлуатації [4—6]. Найбільш прийнятними для такого опису є моделі

в'язкопластичної поведінки матеріалів, що використовують концепцію змінних станів [7]. У згаданих моделях береться до уваги той факт, що у складно навантажених елементах конструкцій, які знаходяться при високих температурах, матеріал веде себе як непружний. Очевидно, що для випадку континуального аналізу напружень доцільним є використання методу кінцевих елементів у поєднанні з непружними моделями [8]. У разі розгляду простих геометричних форм, зокрема біметалевих листів, які одержують автоматичним наплавленням декількома дугами, можна прийняти низку прийнятних спрощень, які суттєво на результат розрахунку впливати не будуть, проте дозволять застосувати класичні методи теорії пружності. На їх основі є можливість комплексно враховувати механічні властивості та геометричні параметри наплавленої пластини, встановити загальні закономірності та механізм взаємодії наплавленого шару з основним матеріалом, характер деформування наплавлених листів, вплив шаруватої побудови наплавленої пластини як композитної конструкції на її напружено-деформований стан (НДС).

Формулювання мети дослідження

На основі методів теорії пружності розробити алгоритм аналітичного визначення напружено-деформованого стану наплавленої пластини значної ширини як композитного двошарового матеріалу під впливом зовнішнього нормально її навантаження, з урахуванням розташування у наплавленому шарі зон підвищеної твердості у вигляді смуг.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо наплавлену призматичну пластину як двошарову конструкцію, в якій деформації матеріалу прямо пропорційні напруженням. Наплавлений шар суцільний. Товщина пластини та наплавленого шару незмінні. Віднесемо пластину до прямокутної системи координат. Вісь z спрямуємо нормально до наплавленої поверхні пластини, осі x, y — вздовж її ребер. Початок осі z сумістимо з наплавленою поверхнею. Наплавлений шар має товщину b_1, пластина — b_2. Двошарову конструкцію будемо вважати спертою шарнірно краями $x = 0$ та $x = a$. Тут a — розмір двошарової конструкції в напрямі осі x. У напрямі осі y її розмір безмежно великий. Лише на наплавлений шар діє нормальна, розподілена сила. Вздовж осі y нормальна сила та переміщення в напрямі осі z розподілені рівномірно. За таких умов деформований стан двошарової конструкції плоский.

Шарам надамо номери 1 та 2. Першим будемо вважати шар наплавленого металу. Номера шарів занесемо в нижні індекси відповідних величин. З наведеного, кінематичні та силові граничні умови мають наступний вигляд:

якщо $x = 0$ або $x = a$, $u_{z1} = u_{z2} = 0$. (1)

якщо $z = Z_1 = -b_1$, $Z_{z1} = P(x)$, (2)

$Z_{x1} = 0$. (3)

якщо $z = Z_2 = -(b_1 + b_2)$, $Z_{z2} = 0$, (4)

$Z_{x2} = 0$. (5)

Шари деформуються сумісно. Переміщення сумісних поверхонь шарів збігаються, сили їх взаємодії врівноважені. Відповідно умови нерозривності та сумісності деформування,

якщо $z = 0$ $u_{z1} = u_{z2}$, (6)

$u_{x1} = u_{x2}$, (7)

$Z_{z1} = Z_{z2}$, (8)

$Z_{x1} = Z_{x2}$. (9)

Класичні методи лінійної теорії пружності дозволяють визначати напружено-деформований стан (НДС) ізотропного пружного тіла в прямокутній системі координат за трьома функціями напружень [9]. Показники НДС пружного тіла в прямокутній системі координат, в межах задачі плоского деформування, описуються наступними залежностями.

$$u_x = -\frac{1-\mu}{E}\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial z},\quad u_z = \frac{1-\mu}{E}\left(2(1-\mu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi,\quad Z_x = \frac{\partial}{\partial x}\left((1-\mu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi,\quad u_y = Z_y = Y_x = 0,$$

$$Y_y = \frac{\partial}{\partial z}\mu\nabla^2\varphi\,,\; X_x = \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\varphi\,,\quad Z_z = \frac{\partial}{\partial z}\left((2-\mu)\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi\,, \tag{10}$$

де $\Delta^2(...) = \frac{\partial^2 ...}{x^2} + \frac{\partial^2 ...}{z^2}$; E, μ — модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Перший (наплавлений шар) складений з J ізотропних смуг. Ширину наплавлених смуг позначимо δ. Поміж наплавленими смугами розташовані смуги, утворені накладенням наплавленого матеріалу суміжних смуг. Їх ширину позначимо Δ. Будемо вважати що на наплавленій пластині ціла кількість наплавлених смуг шириною δ, а смуг шириною Δ — на одиницю менше ніж наплавлених. Модуль пружності наплавлених смуг $E_{1\delta}$. Модуль пружності смуг, утворених накладенням наплавленого матеріалу, $E_{1\Delta}$. У напрямі осі z модулі пружності приймаємо незмінними. Наплавлений шар уявимо як неперервний. Відмінність модулів пружності окремих смуг в наплавленому шарі врахуємо змінним вздовж осі x модулем пружності. Його задамо рядом Фур'є. Останній, для прийнятої кількості наплавлених смуг J, визначається виразом.

$$E_1(x) = \frac{2}{a}\sum_{m=1}^{\infty}\left[E_{1\delta}\sum_{j=1}^{J}\int_{\delta\cdot j+\frac{a-\delta\cdot J}{J-1}(j-1)}^{\delta\cdot j+\frac{a-\delta\cdot J}{J-1}(j-1)+\delta}\sin(\rho_m x)dx + E_{1\Delta}\sum_{j=1}^{J-1}\int_{\left(\delta+\frac{a-\delta\cdot J}{J-1}\right)(j-1)+\delta}^{\left(\delta+\frac{a-\delta\cdot J}{J-1}\right)(j-1)}\sin(\rho_m x)dx\right]\sin(\rho_m x) \tag{11}$$

Можливо також урахування властивостей наплавленого шару прийняттям усередненого значення модулю пружності. За Фохтом його значення

$$E_1 = \frac{E_{1\delta}J\delta + E_{1\Delta}(a - J\delta)}{a}. \tag{12}$$

З урахуванням (11), граничних умов (1), приймемо по одній функції напружень Ері. Оберемо для обох шарів однакові формі функцій, але з відмінними коефіцієнтами.

$$\varphi_\eta = \sum_{m=1}^{\infty}\left(A_{m\eta}e^{\rho_m z} + B_{m\eta}e^{-\rho_m z} + C_{m\eta}e^{\rho_m z}z + D_{m\eta}e^{-\rho_m z}z\right)\sin(\rho_m x), \tag{13}$$

де η = 1, 2; $\rho_m = \pi\frac{m}{a}$; де m — цілі числа; $A_{m\eta}, B_{m\eta}, C_{m\eta}, D_{m\eta}$ — вектори значень невідомих коефіцієнтів.

Граничні умови (2)—(5), умови сумісності (6)—(9), модуль пружності, як функція координати x, та прийнята форма функцій напружень наплавленого шару та пластини становлять собою математичну модель НДС наплавленої пластини значної ширини навантаженої розподіленою силою нормально до її поверхні. Умови (2)—(9) дозволяють для кожного значення m сформувати систему восьмого порядку з вісьмома невідомими коефіцієнтами функцій напружень (13). Розв'язок кожної з систем дозволяє визначити відповідні складові векторів значень невідомих коефіцієнтів. З використанням останніх, за виразами (10) розрахувати показники НДС наплавленої пластини. Наведена послідовність становить собою алгоритм визначення напружено-деформованого стану наплавленої пластини.

Розглянемо застосування алгоритму. Виконувалося дугове наплавлення дротом Св-08А на пластини зі сталі 20, із попереднім локальним нанесенням карбіду титана (TiC). За рахунок локального попереднього нанесення зміцнювача формувалася двошарова конструкція з чергуванням зон більшої та меншої твердості у вигляді смуг, вздовж напрямку дії концентрованого джерела теплоти. Ширина смуг постійна — 8 мм, крок при їх нанесенні — 10 мм. Приймаємо, що незміцнені зони, без нанесення карбіду, за властивостями відповідають литій сталі, а зони, зміцнені TiC — сталі 09Г2СФ (табл. 1).

Таблиця 1. Властивості основного металу та наплавлених шарів

Марка сталі	Структура	Модуль пружності Е, ГПа
Сталь 20	Ферит	212
Лита сталь (сталь 08)	Ферито-перліт	170
Сталь 09Г2СФ	Бейніт	200

Визначимо напружено-деформований стан пластини товщиною b_2 = 4мм, наплавленої шаром металу b_1 = 2мм. Модуль пружності матеріалу пластини $E_2 = 2{,}12\cdot10^5$ МПа, довжина пластини (відстань поміж опорами) a = 82 мм. Розміри наплавленого шару δ = 10 мм, Δ = 2 мм (рис.1). Модуль пружності матеріалу смуг відповідно $E_{1\delta} = 1{,}7\cdot10^5$. МПа та $E_{1\Delta} = 2\cdot10^5$ МПа. Коефіцієнт Пуассона матеріалів наплавленої пластини прийнято рівним 0,25. До середньої смуги прикладене нормальне, рівномірно розподілене навантаження інтенсивності в 1 МПа.

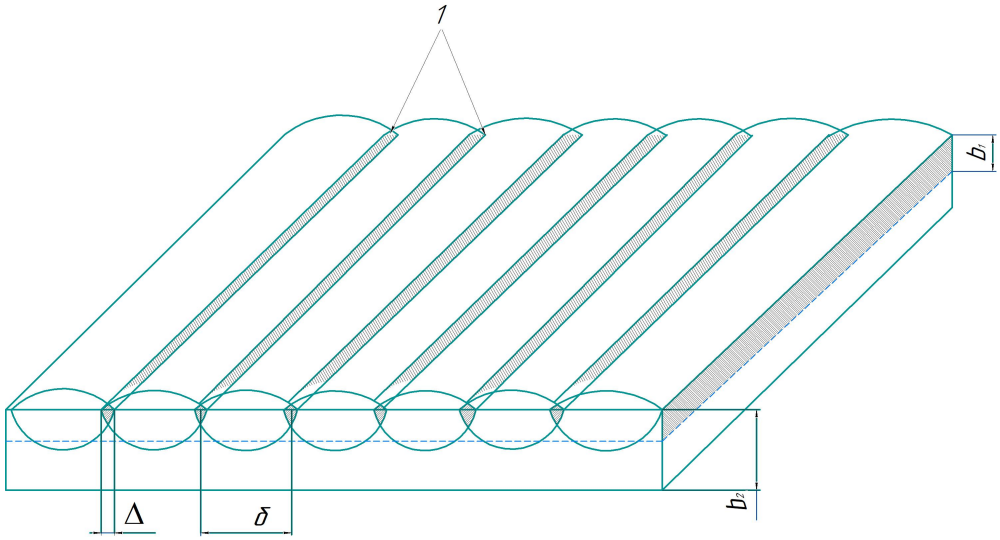

Рис. 1. Загальна схема наплавленої пластини із локальним внесенням зміцнювача (1 — смуги із зміцнювачем)

Прикладене навантаження також задамо рядом Фур'є:

$$P(x)=\frac{2}{a}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\int_{\delta\left(\frac{J+1}{2}\right)+\frac{a-\delta J}{J-1}\left(\frac{J+1}{2}-1\right)}\sin\left(\rho_m x\right)dx\sin\left(\rho_m x\right)}{\left(\delta+\frac{a-\delta J}{J-1}\right)\left(\frac{J+1}{2}-1\right)}. \qquad (14)$$

Функції (11) та (14) передбачають складання безмежної кількості їх складових. В практиці кількість складових обмежують. У розрахунках обмежимо їх кількість тридцятою п'ятьма. Цією ж кількістю обмежили кількість складових функції (13) та розподілу зусилля (14). За наведеним алгоритмом визначили показники НДС пластини, на яку наплавили $J = 7$ смуг. Згадані показники визначали і для випадку усередненого значення модуля пружності (12).

На рис. 2 зображено розподіли навантаження та нормальних напружень поміж шарами.

За рисунком прикладене навантаження, враховане тридцятьма п'ятьма складовими, достатньо достовірно відповідає прийнятому. На рис. 3 наведено розподіл напружень X_x.

Відповідно до наведених графіків, нормальні напруження в пластині у площині $z = Z_1$ не суттєво залежать від способу урахування модуля пружності смуг наплавленого шару. Локальний характер розподіленого навантаження наплавленої поверхні пластини (Z_z) зумовлює характер розподілу X_x напружень, показаних кривими 1. Напруження X_x виникають внаслідок згину пластини. Останній зумовлює зміну знаку напружень по товщині пластини — криві 1 та 2 (рис. 3). Абсолютні екстремальні значення напружень не суттєво відрізняються, як і модулі пружності наплавленого шару та пластини. Згин пластини викликає переміщення поверхонь пластин та взаємодії шарів (рис. 4 та 5).

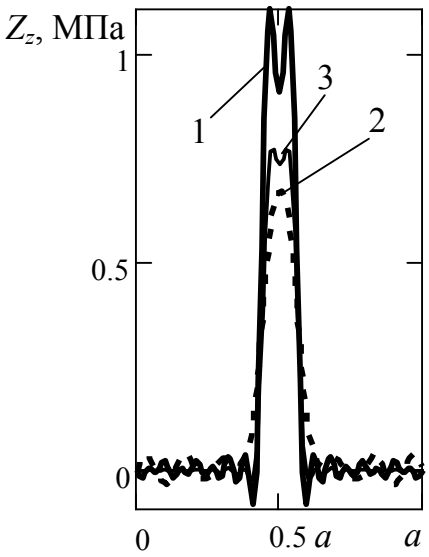

Рис. 2. Розподіл нормальних напружень Z_z по поверхням шарів по довжині платівки: 1— розподіл напружень на поверхні $z = 0$; 2, 3 — по поверхні $z = Z_1$ (остання — 3 — для випадку усереднених значень модуля пружності наплавленого шару).

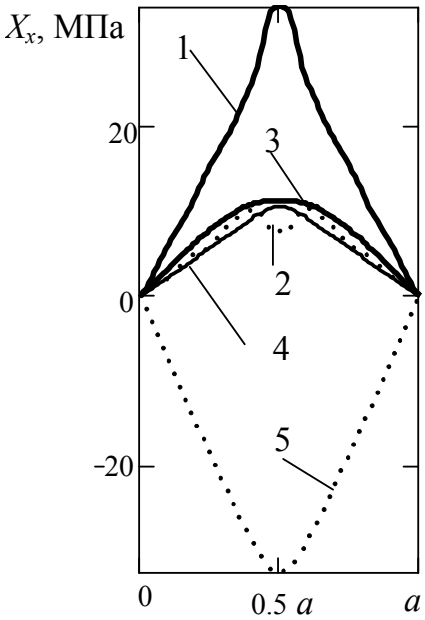

Рис. 3. Розподіл нормальних напружень X_x по поверхням шарів довжиною a: 1— розподіл напружень на поверхні $z = 0$; 2 — по поверхні $z = Z_1$ в наплавленому шарі; 3 — по поверхні $z = Z_1$ в матеріалі наплавленої пластини;, 4 — в площині $z = Z_1$ у суцільній пластині товщиною, що дорівнює товщині пластини з наплавленим шаром; 5 — по поверхні $z = Z_2$.

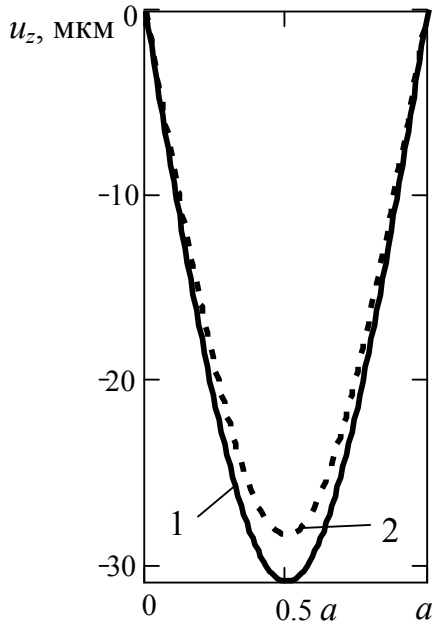

Рис. 4. Прогини пластини: 1 — наплавленої; 2 — суцільної

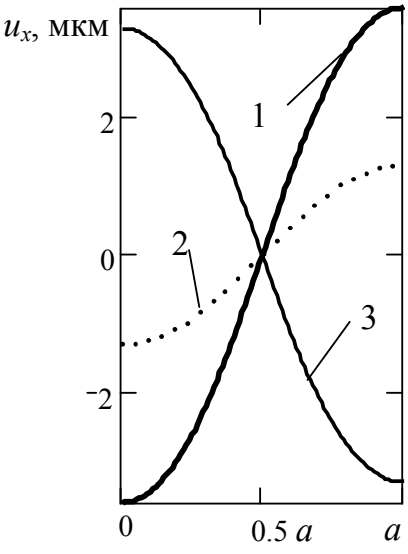

Рис. 5. Переміщення матеріалу (u_x), розташованого на поверхнях шарів пластини нормальних до осі z: 1 — переміщення по поверхні $z = 0$; 2 — по поверхні $z = Z_1$; 3 — , по поверхні $z = Z_2$

Модуль пружності суцільної пластини прийнято рівним модулю пружності другого шару (E_2). Він перевищує модулі пружності наплавлених смуг. Вказане зумовлює більшу жорсткість пластини на згин — менший прогин (крива 2). Різниця модулів пружності шарів пластини призводить до різних переміщень поверхонь наплавленої пластини (рис. 5).

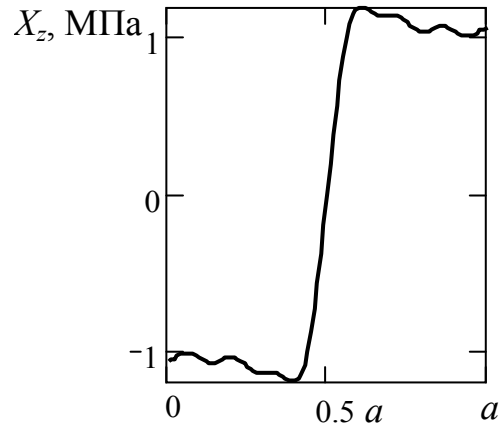

Рис. 6. Розподіл дотичних напружень X_z по поверхні взаємодії шарів

Графіки, наведені на рис. 5, показують, що подовження навантаженої поверхні (крива 1) перевищує подовження вільної (крива 3). Переміщення поверхні взаємодії шарів (крива 2) якісно відповідають деформаціям навантаженого шару. Вказане зумовлено меншою товщиною першого шару відносно другого та меншим модулем пружності його матеріалу.

За площиною взаємодії наплавленого шару та матеріалу пластини діють дотичні напруження (рис. 6).

Інтенсивність екстремальних напружень є близькою до інтенсивності прикладеного розподіленого навантаження (рис. 2).

Згідно виразів (10), значення показників НДС пластини залежать від значень коефіцієнтів Пуассона. Нами проаналізовано вплив останнього на прогин пластини. Встановлено, що зменшення вказаного коефіцієнта для обох шарів до нуля призводить до зростання прогину пластини практично на 8 %. Збільшення коефіцієнта до максимально можливого значення призводить до зменшення прогинів на 20 %. Вказане зменшення має місце і у разі збільшення коефіцієнта матеріалу лише другого шару. Значення коефіцієнта Пуассона впливають також на величини дотичних напружень по поверхні приєднання наплавленого шару матеріалу до основного. Разом з тим, екстремальні значення дотичних напружень, які суттєво впливають на умови відшарування наплавленого матеріалу та визначені для усередненого значення модулю пружності, виявилися на 12 % меншими за значення напружень, що обчислені з урахуванням його нерівномірного розподілу. Зростання коефіцієнта Пуассона лише наплавленого шару спричиняють зростання напружень у наплавленій пластині. Напруження взаємного стискання шарів змінюються в межах від –22 % до +11 % при значенні коефіцієнта $\mu_1 = 0{,}25$. Напруження X_x зменшуються пропорційно значенням коефіцієнта Пуассона на 8 % та практично залишаються незмінними зі зростанням цього коефіцієнта. Дотичні напруження змінюються в межах від –21 % до +7 %.

Висновки

На основі методів лінійної теорії пружності, з використанням функції напружень (Ері), сформовано математичну модель та алгоритм аналітичного визначення напружено-деформованого стану наплавленої пластини значної ширини як композитної конструкції, складеної з двох шарів матеріалу, та навантаженою нормальною силою. Модуль пружності навантаженого шару змінний вздовж пластини. Характер зміни відповідає зміні модуля пружності матеріалу, наплавленого смугами.

Встановлено, що нормальні напруження у зоні сплавлення шарів не суттєво залежать від способу урахування модуля пружності смуг наплавленого шару. Напружено-деформований стан пластини залежить від значень коефіцієнта Пуассона для матеріалів основного та наплавленого шарів. Застосування матеріалів з мінімальними значенням коефіцієнту Пуассона супроводжується зростанням прогину пластини практично на 8 %. Збільшення цього коефіцієнта до максимального реального значення спричиняє зменшення прогину на 20 %. Значення коефіцієнта Пуассона впливають на дотичні напруження по поверхні приєднання наплавленого шару до основного металу.

Екстремальні розрахункові значення дотичних напружень, визначені без урахування нерівномірного розподілу значень модуля пружності поміж смугами наплавленого шару, виявилися на 12 % меншими за відповідні значення напружень, визначених з урахуванням факти-

чного розподілу. Отже, при визначенні екстремальних дотичних напружень в площині з'єднання наплавленого шару з основним матеріалом нерівномірний розподіл модулю пружності матеріалу наплавленого шару слід враховувати.

Застосування схеми наплавлення з розташуванням на пластині зміцнювача з підвищеним значенням коефіцієнту Пуассона у вигляді поздовжніх смуг дозволяє підвищити жорсткість конструкції до 20 %.

Врахування шаруватого характеру зміни показників пружності наплавленого металу при визначенні напрямку прикладання зовнішнього навантаження для правки та формоутворення заготівок сприятиме зменшенню розтріскування у більш крихких ділянках

Список використаної літератури

1. Zabolotny K., Zhupiev O., Molodchenko A. Analysis of current trends in development of mine hoists design engineering. *New Developments in Mining Engineering Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining.* 2015. CRC Press/Balkema. P. 175–179.
2. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. Киев, Вища школа. 1987. 246 с.
3. Peremitko V. V., Kolomoyets I. V. Influence of orientation of zones of increased hardness of composite layers on their resistance to wear. *Archives of Materials Science and Engineering* 2021. Volume 110. Issue 2. P. 59–71.
4. Рябцев И. А., Сенченков И. К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: Електротехнологія, 2013. 300 с.
5. Бабинец А. А. Влияние химического состава и структуры наплавленного металла на деформации тонких стальных пластин. *Автоматичне зварювання.* 2019. № 6. С. 55–59.
6. Сенченков І. К., Рябцев І. О., Червінко О. П., Бабінець А. А. Розрахунок залишкового напружено-деформованого стану наплавлених сталевих тонколистових пластин. *Автоматичне зварювання.* 2021. № 5. С. 51–55.
7. Krempl E. Viscoplastic models for high temperature applications. *Inernational journal of Solids and Structures*. 2000. Vol.37. P. 279–291.
8. Nix W.D., Gibeling J.C., Hughes D.A. Time-dependent behavior of metals. *Met. Tranc. A*. 1985. Vol.16A. P.2216–2226.
9. Рекач В.Г. Руководство к решению задач по теории упругости. Учеб. пособие для вузов. М., Высшая школа, 1977. 216 с.

INFLUENCE OF METAL LAYER SURFACED WITH LOCAL ADDITION OF AMPLIFER ON THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF THE PLATE

Belmas I., Peremitko V., Tantsiura G., Bilous O., Kolomoyets I.

Abstract

One of the important aspects of the surfacing process, both restorative and strengthening, is the formation of metal layers that differ significantly in physical and mechanical properties from the base. At the same time, the local action of a concentrated heat source causes uneven heating of the workpiece in thickness, and the crystallization of the deposited layer is accompanied by casting shrinkage and structural transformations, the stress-deformed state of such objects will be quite unfavorable both from the point of view of forming and the subsequent operation of the finished products. In view of this, based on the methods of the theory of elasticity, develop an algorithm for analytically determining the stress-strain state of a welded plate of considerable width as a composite two-layer material under the influence of external normal loading, taking into account the location of zones of increased hardness in the form of strips in the welded layer. The surfaced prismatic plate was adopted as a two-layer structure, in which the deformations of the material are directly proportional to the stresses. The deposited layer is continuous. The thickness of the plate and the deposited layer are unchanged. By

using the dependences of the stress-strain state indicators on one stress function, a mathematical model of the welded plate as a two-layer structure was formed. An algorithm for determining the deformations and distribution of stresses in the plate under the condition of its flat deformation in the direction of surfacing is constructed. The periodic change of the modulus of elasticity of the deposited layer is taken into account. The indicators of the stress-strain state of the plate from its normal load were determined. The effect of Poisson's ratio on the layer-by-layer distribution of stresses in the plate is shown.

References

[1] Zabolotny K., Zhupiev O., Molodchenko A. (2015). Analysis of current trends in development of mine hoists design engineering. *New Developments in Mining Engineering Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*. CRC Press/Balkema. P. 175–179 [In English].

[2] Kasatkin B.S., Prokhorenko V.M., Chertov I.M. (1987). Napryazheniya i deformatsii pri svarke [*Stresses and strains during welding*]. Kiev, High School [In Russian].

[3] Peremitko V. V., Kolomoyets I. V. (2021). Influence of orientation of zones of increased hardness of composite layers on their resistance to wear. *Archives of Materials Science and Engineering* 2021. Volume 110. Issue 2. P. 59–71 [In English].

[4] Ryabtsev I. A., Senchenkov I. K. (2013). Teoriya i praktika naplavochnykh rabot [*Theory and practice of surfacing works*]. Kiev: Elektrotechnology. 300 p. [In Russian].

[5] Babinets A. A. (2019). Vliyaniye khimicheskogo sostava i structury naplavlennogo metalla na deformatsii tonkikh stal'nykh plastin [*Influence of chemical composition and structure of welded metal on deformation of thin steel plates*]. *Automatic welding*. № 6. P. 55–59 [In Russian].

[6] Senchenkov I. K., Ryabtsev I. O., Chervinko O. P., Babinets' A. A. (2021). Rozrakhunok zalyshkovogo napruzheno-deformovanogo stanu naplavlenykh stalevykh tonkolystovykh plastyn [*Calculation of residual stress and derform state of welded steel thin plates*]. *Automatic welding*. № 5. P. 51–55 [in Ukrainian].

[7] Krempl E. (2000). Viscoplastic models for high temperature applications. *Inernational journal of Solids and Structures*. Vol.37. P. 279–291 [in English].

[8] Nix W.D., Gibeling J.C., Hughes D.A. (1985). Time-dependent behavior of metals. *Met. Tranc. A*. Vol.16A. P.2216–2226 [in English].

[9] Rekach V.G. (1977) Rukovodstvo po resheniyu zadach po teorii uprugosti [*Manual for solving tasks of elasticity theory*] . Study handbook for high schools. Moscow. High school. 216 p.