

Прохоренко Д.В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, м. Київ

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПОЗДОВЖНІХ ШВІВ ОДНОМІРНИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА КРИТЕРІЄМ ВІДСУТНОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ЗАЛИШКОВОГО ПРОГИНУ

### Анотація

Запропоновано розрахунковий алгоритм оптимізації за критерієм відсутності деформації залишкового прогину засобами математичного пакету MathCAD погонної енергії зварювання поздовжніх швів другої черги (третього і четвертого) одномірних зварних конструкцій коробчатого поперечного перерізу при обраній технологічній послідовності зварювання всіх поздовжніх швів без застосування складально-зварювальної оснастки. Даний метод запобігання утворенню залишкових деформацій прогину після зварювання поздовжніх швів має особливо важливе значення для одномірних зварних конструкцій пониженої жорсткості, є практично без витратним, енергозберігаючим, прогнозованим за очікуваним результатом, зручним у використанні, високоінтелектуальним.

### Abstract

The calculation optimization algorithm by the criterion of absence the residual flexure deformation by mathematical package Mathcad facilities rate of energy input at welding of longitudinal joints of second priorities (third and fourth) of one-dimensional designs with box-shaped cross-section for selecting welding technological order all longitudinal joints without application bonding fixture is proposed. This method of prevention the formation residual flexure deformation after welding of longitudinal joints have important matter for one-dimensional designs with low rigidity and practically be inexpensive, energy efficient, forecast by the expecting results, comfortable in use, high intellectual.

Підвищення точності виготовлення зварних конструкцій, в тому числі і одномірних, є однією з важливих проблем, від розв'язання якої залежить трудомісткість виготовлення конструкцій, їх вартість та експлуатаційні характеристики. У процесі виготовлення зварних конструкцій в них утворюються залишкові деформації, які спричиняють негативний вплив на працездатність, експлуатаційні показники та зовнішній вигляд.

Одномірні зварні конструкції (у подальшому стержні) коробчатого поперечного перерізу є поширеними конструктивними елементами багатьох зварних конструкцій і при пониженої їх жорсткості в них може утворюватись значна деформація прогину осевої лінії від зварювання поздовжніх швів [1-4].

Технологічні рекомендації з метою зменшення такого виду залишкової деформації здебільшого зводяться до необхідності застосування після зварювання теплової правки за тією чи іншою схемою нагрівання. Обсяги теплової правки і відповідно трудомісткість такої технологічної операції суттєво залежать від норм допустимих відхилень контрольних розмірів конструкції і величин залишкових деформацій від зварювання.

В багатьох випадках рекомендації зводяться просто до дотримання технологічної послідовності виконання швів „навхрест”. Але такий підхід не завжди дає бажані результати, а інші методи [4] зменшення деформації прогину є технологічно складними, трудомісткими і енерговитратними.

З нашого погляду дана науково-технічна задача може бути успішно вирішена на основі розрахункової оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги, тобто третього і четвертого, за критерієм відсутності деформації залишкового прогину. Крім того, алгоритм оптимізації є зручним і ефективним розрахунковим інструментом для порівняльного дослідження доцільності різних технологічних схем зварювання швів.

Розглянемо в системі координат  $XOY$  по середній лінії контуру поперечний переріз коробчатого стержня з однаковою товщиною полиць і стінок  $\delta \ll B, H$ , показаний на рис 1.

Стержень зібраний на прихватках і в силовому відношенні всі його конструктивні елементи у вигляді двох стінок та двох полиць являють собою одне ціле, тобто при зварюванні поздовжніх швів сприймають силові навантаження так, як це було б у випадку суцільного коробчатого перерізу.

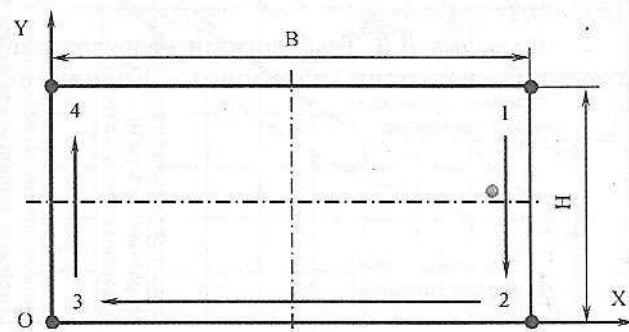


Рис. 1. Схема поперечного коробчатого перерізу стержня з чотирма поздовжніми швами, звареними в послідовності 1...4

В той же час вважаємо, що тепловий потік від зварювальної дуги не переходить з одного елемента на інший через не зварені стики. Оскільки стержень є одномірною конструкцією, то наближено можна прийняти також припущення, що напружено-деформований стан стержня в розрахункових перерізах при нагріванні під час зварювання швів і після охолодження є лінійним і повна деформація на стадії нагрівання у всіх поперечних перерізах стержня між тими двома крайніми з них вздовж довжини стержня, в яких визначаються відрізки зони пластичних деформацій скорочення (ЗПДС) з обох боків шва, розподіляється за законом площини і є однаковою, що підтверджується численними розрахунками ширини ЗПДС у багатьох інших випадках зварювання тих чи інших конструктивних елементів [5]. До того ж і координати вздовж осі шва щойно згаданих вище крайніх перерізів, як правило, мало відрізняються між собою, хоч і мають деяку різницю  $\Delta$ . З метою зменшення часу на розрахунки оптимізаційної задачі будемо припускати, що максимальну пластичну деформацію скорочення в межах ширини ЗПДС на стадії нагрівання можна визначати не за складним алгоритмом, викладеним у роботі [5], а як різницю між згаданою вище однаковою повною деформацією поперечних перерізів в межах відрізка  $\Delta$  і сумою температурної та пружної деформацій у точках кривої  $\Gamma t$ , яка є проєкцією на площину конструктивного елемента, що зварюється, рухомої квазістаціонарної кривої максимальних температур в межах ширини ЗПДС з обох боків шва.

Складний розрахунковий переріз в околі шва, що зварюється в даний момент, в межах ЗПДС проходить по кривих  $\Gamma t$  до точок на відстані  $s_1$  від осі шва з обох його боків, в яких температура досягає  $600^\circ\text{C}$ . Точки з даною температурою розташовані у відповідному поперечному перерізі і з'єднуються між собою відрізком  $2 \cdot s_1$ . За межами ЗПДС розрахунковий переріз в загальному випадку проходить по двох різних поперечних перерізах стержня, починаючи від точок перетину кривих  $\Gamma t$  та  $\Gamma b$  на межі ЗПДС з обох сторін шва і закінчуючи на ребрі коробчатого стержня, діагонально протилежному до шва, що зварюється в даний момент. Криві  $\Gamma b$  [5] з обох боків шва є геометричним місцем точок у зварюваних даним швом конструктивних елементах, в яких починається поздовжня пластична деформація скорочення. Між кінцями розрахункового перерізу на діагонально протилежному ребрі утворюється сходинка заввишки  $\Delta$ , вздовж якої необхідно з'єднати кінці згаданого розрахункового перерізу, перетворивши в такий спосіб його контур на бічній поверхні коробчатого стержня у замкнену ламано-криволінійну лінію.

Таким чином, маємо чотири поздовжніх шва, при зварюванні кожного з яких для визначення напружено-деформованого стану стержня необхідно скласти і розв'язувати по дві системи нелінійних рівнянь відповідно для стадії нагрівання та залишкового стану, складених із рівнянь рівноваги для осьових сил і моментів та умов пластичності для точок на межі тих чи інших пластичних

зон, які утворюються в околі зварених швів. Отже, загалом будемо мати вісім систем рівнянь, які можна об'єднати в одну, дві, три або п'ять систем. У випадку двох систем рівнянь одна з них буде містити в собі всі рівняння (загальна кількість рівнянь – чотири), пов'язані із зварюванням першого і другого швів (перша черга), а друга система (чотири рівняння) – із зварюванням третього і четвертого швів (друга черга) з оптимізаційними параметрами  $\psi_3$  і  $\psi_4$ . У випадку трьох систем матимемо по одній системі із двох рівнянь кожна окремо для першого і другого швів, які об'єднують стадії нагрівання та охолодження кожного шва, а також одну систему (чотири рівняння) для разом узятих третього і четвертого швів з оптимізаційними параметрами  $\psi_3$  і  $\psi_4$ . Насамкінець, останній випадок передбачає існування окремих чотирьох систем (по одному рівнянню відповідно для стадії нагрівання та залишкового стану) першого і другого швів та однієї системи (чотири рівняння) для третього і четвертого швів, як у попередньому випадку. Який з названих варіантів обрати? Були спробовані всі згадані варіанти і з'ясувалось, що найбільший час розв'язування модельної задачі для сучасного комп'ютера (близько двох годин) маємо у випадку вибору алгоритму з однією системою рівнянь (в системі вісім рівнянь), тобто коли для оптимізації необхідно перебирати в процесі обчислення не тільки рівняння для третього і четвертого швів, погонна енергія яких оптимізується, а всі рівняння для всіх швів. Найменший час обчислення маємо в останньому випадку п'яти рівнянь (близько 0,5 години). Отже, цей варіант і був нами остаточно обраний.

При складанні систем рівнянь бажано мати більш-менш правдоподібні уявлення відносно механізму пружно-пластичного деформування полиць і стінок стержня при зварюванні кожного з чотирьох швів. Хоч у більшості випадків зварювання коробчатих стержнів різних розмірів і на різних режимах повністю уникнути в такий спосіб можливих неточностей у згаданому механізмі деформування майже неможливо, все-таки обсяг роботи по корекції окремих рівнянь системи, при пробному розрахунку в порядку моніторингу алгоритму оптимізації, значною мірою буде зменшено.

Наведемо в загальних рисах опис механізму пружно-пластичного деформування стержня при зварюванні кожного з чотирьох швів для даного випадку модельної задачі.

**Шов 1 (правий верхній), стадія нагрівання.** При зварюванні шва 1 в його околі у поперечному перерізі стержня до високих температур нагріваються верхня полиця (позначення  $U$ ) та права стінка (позначення  $R$ ), де утворюються ЗПДС заввишки відповідно  $bnU_1$  та  $bnR_1$  (цифри 1 вказують на утворення даних параметрів при зварюванні шва 1). В межах інтервалів  $[bnU_1, s_2]$  та  $[bnR_1, s_2]$  на кривих  $\Gamma t$  з обох боків шва 1, тобто на верхній полиці і правій стінці, пружна деформація скорочення дорівнює  $\epsilon_s$ , що відповідає межі текучості  $\sigma_s$  матеріалу стержня. Для ближчих до шва з обох його боків точок кривої  $\Gamma t$  в межах інтервалів  $[s_2, s_1]$  відповідно до прийнятого припущення пружна деформація скорочення зменшує-



ться від  $\epsilon_s$  до нуля за лінійним законом. За межами ЗПДС як для полиці, так і для стінки пружна деформація визначається різницею між повною і температурною деформаціями. Для лівої стінки і нижньої полиці пружна деформація дорівнює повній відповідно до прийнятого припущення про відсутність їх нагрівання через не заварені шви 3 і 4. В цілому на стадії нагрівання стержень видовжується і вигинається з утворенням повної поздовжньої деформації відповідно до закону площини з прогином випуклістю в сторону шва 1, який заварюється на даному етапі.

Шов 1 (правий верхній), залишковий стан. Після охолодження шва 1 напружено-деформований стан у всіх поперечних перерізах стержня по його довжині вважаємо однаковим, прикінцеві ділянки поблизу торців до уваги не приймаємо. Отже, в поперечному перерізі матимемо повну поздовжню деформацію скорочення теж за законом площини, але з вигином протилежного напрямку випуклістю в сторону ребра, діагонально протилежного шву 1. Пластична деформація скорочення в межах  $bnU1$  та  $bnR1$  зумовлює в залишковому стані утворення майже на всій ширині цих зон пружної деформації видовження, яка досягає величини межі текучості  $\epsilon_s$  на відстанях від осі шва  $bB$  та  $bH$  відповідно для верхньої полиці та правої стінки. На інтервалах  $[bnB1, bB]$  та  $[bnR1, bH]$  залишкова пружна деформація визначається різницею між залишковими повною та пластичною деформаціями, причому залишкова пластична деформація дорівнює максимальній пластичній деформації скорочення для стадії нагрівання у відповідних точках кривих  $\Gamma_m$ . Для лівої стінки і нижньої полиці в залишковому стані пружна деформація дорівнює повній залишковій деформації для даних конструктивних елементів стержня. В межах  $bnU1$  та  $bnR1$  залишкова пластична деформація скорочення визначається різницею між залишковими повною та пружною деформаціями.

Шов 2 (правий нижній), стадія нагрівання. При зварюванні шва 2 з'єднуються між собою нижня полиця (позначення  $D$ ) та права стінка (позначення  $R$ ), в яких в околі шва 2 утворюються ЗПДС завширшки відповідно  $bnD2$  та  $bnR1$ . Процес деформування стержня на стадії нагрівання при зварюванні шва 2 в цілому є подібним до описаного вище при зварюванні шва 1, але необхідно враховувати наявність залишкової пластичної деформації скорочення в зонах  $bnU1$  та  $bnR1$  при визначенні в них пружної деформації на стадії нагрівання в процесі зварювання шва 2, де пружна деформація в загальному випадку дорівнює різниці між повною та сумою температурної (від шва 2) і залишкової пластичної (від шва 1) деформацій за умови, що величина пружної деформації при цьому не перевищує  $\epsilon_s$ . Якщо для точок деякого інтервалу формально визначена в такий спосіб пружна деформація перевищує рівень  $\epsilon_s$ , що можна з'ясувати побудовою відповідного графіка для пружної деформації в даному конструктивному елементі стержня, то на цьому інтервалі її треба прийняти рівною  $\epsilon_s$  і зробити відповідну корекцію в рівняннях системи, яку склали перед цим з метою розв'язування задачі. Після розв'язування системи

рівнянь для стадії нагрівання визначаємо для цієї стадії пластичну деформацію скорочення у точках всіх утворених ЗПДС в перерізі стержня, що є необхідним при складанні наступної системи рівнянь для знаходження залишкового стану після зварювання шва 2. Якщо  $H < B$ , то можна очікувати, що при нагріванні шва 2 ліній повної деформації для правої стінки більшою мірою буде зміщуватись вгору, аніж повертатись, створюючи в такий спосіб умови для пластичного видовження в ЗПДС шва 1 і збільшуючи довжину відрізків  $bB$  та  $bH$  відповідно до довжини  $wB$  та  $wH$ .

Шов 2 (правий нижній), залишковий стан. Після зварювання шва 2 в ЗПДС  $bnD2$  та  $bnR2$  утворюються залишкові пружні деформації розтягу, які відповідно на відстанях  $tD$  та  $tR$  від осі шва 2 досягають межі  $\epsilon_s$  і залишаються такими для всіх точок відрізків  $tD$  та  $tR$ . На інтервалах  $ta$  та  $tb$  пружна залишкова деформація визначається різницею між повною та пластичною залишковими деформаціями після зварювання шва 2, причому пластична залишкова деформація на цих інтервалах дорівнює пластичній деформації для стадії нагрівання при зварюванні шва 2. Для решти площі поперечного перерізу обох полиць та правої стінки поза межами названих інтервалів, а також лівої стінки пружна залишкова деформація дорівнює повній залишковій деформації для згаданих конструктивних елементів.

Шов 3 (лівий нижній), стадія нагрівання. При зварюванні шва 3 в його околі утворюються нові ЗПДС завширшки  $bnD3$  та  $bnL3$  відповідно у нижній полиці ліворуч біля лівої стінки стержня та у лівій стінці знизу. Розподіл на стадії нагрівання пружних деформацій в зонах  $bnD3$  та  $bnL3$  є типовим для зварювання тонколистових елементів і враховується при складанні системи рівнянь аналогічно тому, як це робилось при зварюванні швів 1 і 2. Розподіл температур теоретично тепер уже має місце в кожному з конструктивних елементів стержня, хоч в деяких з них (наприклад,  $U$  та  $R$ ) температура практично не підвищується. За рахунок нагрівання стержень дещо видовжується і прогинається випуклістю в сторону шва 3, повна деформація відповідає закону площини. Інтуїтивно припускаємо, що при нагріванні від зварювання шва 3 за рахунок значного повороту розрахункового перерізу пластична деформація в зоні шва 1 не змінюється і пружна деформація в цій зоні шва визначається різницею між повною деформацією при нагріванні від шва 3 і сумою деформацій температурної від шва 3 та пластичної залишкової після охолодження шва 2. В ЗПДС шва 2 збільшується довжина відрізків  $tD$  та  $tR$  відповідно до  $tD2$  та  $tR2$  з пружною деформацією в межах їх довжини на рівні  $\epsilon_s$ . На інтервалах  $[bnD2, tD2]$  та  $[bnR2, tR2]$  пружна деформація визначається різницею між повною при нагріванні шва 3 та сумою температурної при нагріванні шва 3 і залишкової пластичної деформації після охолодження шва 2. В точках решти перерізу складного розрахункового перерізу стержня пружна деформація дорівнює різниці між повною та температурною деформаціями при нагріванні від шва 3.

**Шов 3 (лівий нижній), залишковий стан.** В залишковому стані після охолодження шва 3 стержень вкорочується і вигинається випуклістю загалом в сторону ребра, діаметрально протилежного шву 3. При цьому в ЗПДС шва 3 формується типовий для даного місця зварного з'єднання розподіл залишкових деформацій видовження, які досягають рівня  $\epsilon_s$  на довжині відрізків  $\theta D$  та  $\theta L$  від осі шва 3 відповідно у нижній полиці та лівій стінці. Припускаємо, що на довжині відрізків  $tD2$  та  $tR2$  в околі шва 2 залишкова пружна деформація видовження буде залишатись на рівні  $\epsilon_s$ . На відрізках  $wB$  та  $wH$  в околі шва 1 залишкова пружна деформація розтягу буде меншою від  $\epsilon_s$  і має визначатись різницею між повною і пластичною залишковими деформаціями після охолодження шва 3, причому пластична залишкова деформація дорівнює пластичній деформації на стадії нагрівання шва 2. В ЗПДС шва 3 поза межами відрізків  $\theta D$  та  $\theta L$  пружна деформація визначається різницею між залишковою повною після охолодження шва 3 та пластичною на стадії нагрівання шва 3. В ЗПДС шва 2 поза межами відрізків  $tD2$  та  $tR2$  залишкова пружна деформація дорівнює різниці між залишковою повною деформацією після охолодження шва 3 і пластичною деформацією на стадії нагрівання шва 2. Для точок решітки поперечного перерізу стержня залишкова пружна деформація після охолодження шва 3 дорівнює повній залишковій деформації на цій же стадії розгляду, параметри якої для полиць і стінок стержня визначаються на основі розв'язування системи рівнянь для залишкового стану після охолодження шва 3.

**Шов 4 (лівий верхній), стадія нагрівання.** Даний шов є останнім замикаючим швом для стержня такого перерізу. Теплові потоки від нього розповсюджуються по конструктивних елементах стержня в обидві сторони від осі шва 4 і теоретично зустрічаються на діаметрально протилежному до шва 4 ребрі стержня, де їх значення практично можна вважати нульовим. В околі шва 4 утворюються ЗПДС  $bnU4$  та  $bnL4$  відповідно на верхній полиці та лівій стінці. Розподіл і визначення пружних деформацій на стадії нагрівання в межах  $bnU4$  та  $bnL4$  є типовим для подібних ЗПДС інших швів на стадіях їхнього нагрівання. Відрізки  $\theta D$  та  $\theta L$  в околі шва 3 з залишковою після шва 3 пружною деформацією видовження на рівні  $\epsilon_s$  дещо будуть збільшуватись до довжини відповідно  $sD$  та  $sL$  за рахунок зміни повної деформації в цій зоні в сторону збільшення видовження внаслідок температурного нагрівання від шва 4, зменшуючи в такий спосіб залишкову (після шва 3) пластичну деформацію скорочення. Зміни пластичної деформації скорочення в околі швів 1 та 2 при нагріванні від шва 4 в більшості випадків зварювання стержнів з подібним співвідношенням сторін поперечного перерізу очікувати не варто, але перевірку такої можливості шляхом побудови відповідних графіків розподілу пружних деформацій в ЗПДС попередньо зварених швів на стадії нагрівання поточного шва доцільно робити завжди аби убезпечитись від можливих помилок у складанні відповідних систем рівнянь. Отже, на довжині відрізків  $sD$  та  $sL$  пружна деформація

при нагріванні від шва 4 буде дорівнювати  $\epsilon_s$ . На інтервалах  $[bnD3, sD]$ ,  $[bnL3, sL]$  ЗПДС шва 3 та в межах всієї ширини ЗПДС швів 1 і 2 пружну деформацію при нагріванні від шва 4 необхідно визначати як різницю між повною деформацією на стадії нагрівання від шва 4 і сумою температурної та пластичної деформацій при нагріванні шва 4, причому пластична деформація в цих зонах буде дорівнювати залишковій пластичній деформації після охолодження шва 3. На решті площі розрахункового перерізу стержня поза межами всіх ЗПДС пружна деформація при нагріванні від шва 4 буде визначатись як різниця між повною і температурною деформаціями для даної стадії нагрівання.

**Шов 4 (лівий верхній), залишковий стан.** В залишковому стані в межах ЗПДС шва 4 формуються за відомим [3] механізмом відрізки завдовжки  $cU$  та  $cL$  з пружною деформацією видовження  $\epsilon_s$ . На решті поперечного перерізу всіх ЗПДС пружна залишкова деформація визначається різницею між повною та пластичною залишковими деформаціями. При цьому в ЗПДС шва 4 залишкова пластична деформація визначається як різниця між повною та сумою температурної і пружної деформацій на рівні  $-\epsilon_s$  на стадії нагрівання від шва 4. Для ЗПДС швів 1 і 2 пластична залишкова деформація після шва 4 залишається такою ж, як і на стадії нагрівання при зварюванні шва 4. За межами всіх ЗПДС в кінцевому залишковому стані після охолодження шва 4 пружна деформація скорочення дорівнює повній залишковій деформації, причому на всьому поперечному перерізі реактивної зони вона є однаковою, якщо зварювання швів 3 і 4 здійснюється на оптимізованих значеннях погонної енергії. Таким чином, описаний вище більш-менш детально механізм пружно-пластичного деформування стержня симетричного коробчатого поперечного перерізу при послідовному зварюванні чотирьох поздовжніх швів дає можливість записати в загальному вигляді такі вісім систем рівнянь:

$$\begin{cases} N_{1h} = 0, & Mx_{1h} = 0, & My_{1h} = 0, \\ \epsilon ehU1(x = B - bnU1) + \epsilon_s = 0, \\ \epsilon ehR1(y = H - bnR1) + \epsilon_s = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_{1r} = 0, & Mx_{1r} = 0, & My_{1r} = 0, \\ \epsilon erU1(x = B - bB) - \epsilon_s = 0, \\ \epsilon erR1(y = H - bH) - \epsilon_s = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_{2h} = 0, & Mx_{2h} = 0, & My_{2h} = 0, \\ \epsilon ehD2(x = B - bnD2) + \epsilon_s = 0, \\ \epsilon ehR2(y = bnR2) + \epsilon_s = 0, \\ \epsilon ehU2(x = B - wB) - \epsilon_s = 0, \\ \epsilon ehR2(y = H - bH) - \epsilon_s = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} N_{2r} = 0, & Mx_{2r} = 0, & My_{2r} = 0, \\ \epsilon erD2(x = B - tD) - \epsilon_s = 0, \\ \epsilon erR2(y = tR) - \epsilon_s = 0. \end{cases} \quad (4)$$





$$\begin{cases} N_{3h} = 0, & Mx_{3h} = 0, & My_{3h} = 0, \\ \varepsilon_{ehD3}(x = bnD3) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehL3}(y = bnL3) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehD3}(x = B - tD2) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehR3}(y = tR2) - \varepsilon_s = 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} N_{3r} = 0, & Mx_{3r} = 0, & My_{3r} = 0, \\ \varepsilon_{ehD3}(x = \theta D) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehL3}(y = \theta L) - \varepsilon_s = 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_{4h} = 0, & Mx_{4h} = 0, & My_{4h} = 0, \\ \varepsilon_{ehU4}(x = bnU4) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehL4}(y = H - bnL4) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehD4}(x = sD) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{ehL4}(y = H - sL) - \varepsilon_s = 0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_{4r} = 0, & Mx_{4r} = 0, & My_{4r} = 0, \\ \varepsilon_{erD4}(x = cU) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{erL4}(y = H - cL) - \varepsilon_s = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Розгорнута форма систем (1)...(8) в роботі не наводиться у зв'язку з їх громіздким виглядом.

Параметри  $\psi_3$  та  $\psi_4$  оптимізації погонної енергії зварювання відповідно швів 3 та 4 входять до рівнянь систем (5)...(8). Спочатку з метою контролю уявного механізму пружно-пластичного деформування при зварюванні швів стержня рекомендується, прийнявши  $\psi_3 = \psi_4 = 1$ , послідовно розв'язати всі вісім наведених систем рівнянь, побудувати графіки розподілу пружних деформацій в елементах стержня, проаналізувати їх на предмет перевищення пружною деформацією рівня  $\varepsilon_s$  і при необхідності зробити корекцію окремих рівнянь наведених вище систем. Далі необхідно чотири останні системи (5)...(8) об'єднати в одну систему і розв'язувати дану задачу з самого початку як таку, що містить п'ять систем рівнянь з оптимізацією параметрів  $\psi_3$  та  $\psi_4$  за додатковою умовою відсутності залишкового прогину стержня у формі рівномірного розподілу по поперечному перерізу стержня повної залишкової дефор-

мації скорочення. Насамкінець, доцільно при знайдених значеннях  $\psi_3$  та  $\psi_4$  записати залежності для деформацій в елементах стержня на стадіях нагрівання і в залишковому стані при зварюванні швів 3 та 4 і здійснити контроль розподілу пружної деформації на предмет перевищення нею рівня  $\varepsilon_s$ .

З метою перевірки працездатності розробленого алгоритму оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги при обраній технологічній послідовності зварювання всіх поздовжніх швів розв'язували модельну задачу при таких початкових даних: розміри поперечного перерізу стержня по середній лінії контуру  $B=15$  см,  $H=5$  см, товщина полиць і стінок  $\delta=0,5$  см,  $\varepsilon_s=1,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha=12 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ ,  $a=0,081$   $\text{см}^2/\text{сек}$ ,  $\lambda=0,42$   $\text{Дж}/(\text{см}\cdot\text{сек}\cdot^\circ\text{C})$ , погонна енергія зварювання швів 1 і 2  $q_n=3,6 \cdot 10^3$   $\text{Дж}/\text{см}$ . Ставилась задача оптимізувати режими зварювання швів 3 і 4 порівняно з режимом зварювання швів 1 і 2, тобто знайти параметри  $\psi_3$  та  $\psi_4$ , а також у порядку моніторингу прослідкувати за кінетикою деформацій в елементах стержня на етапі нагрівання і в залишковому стані при зварюванні кожного із чотирьох поздовжніх зварних швів. Результати обчислень наведені на рисунках 2 ... 9.

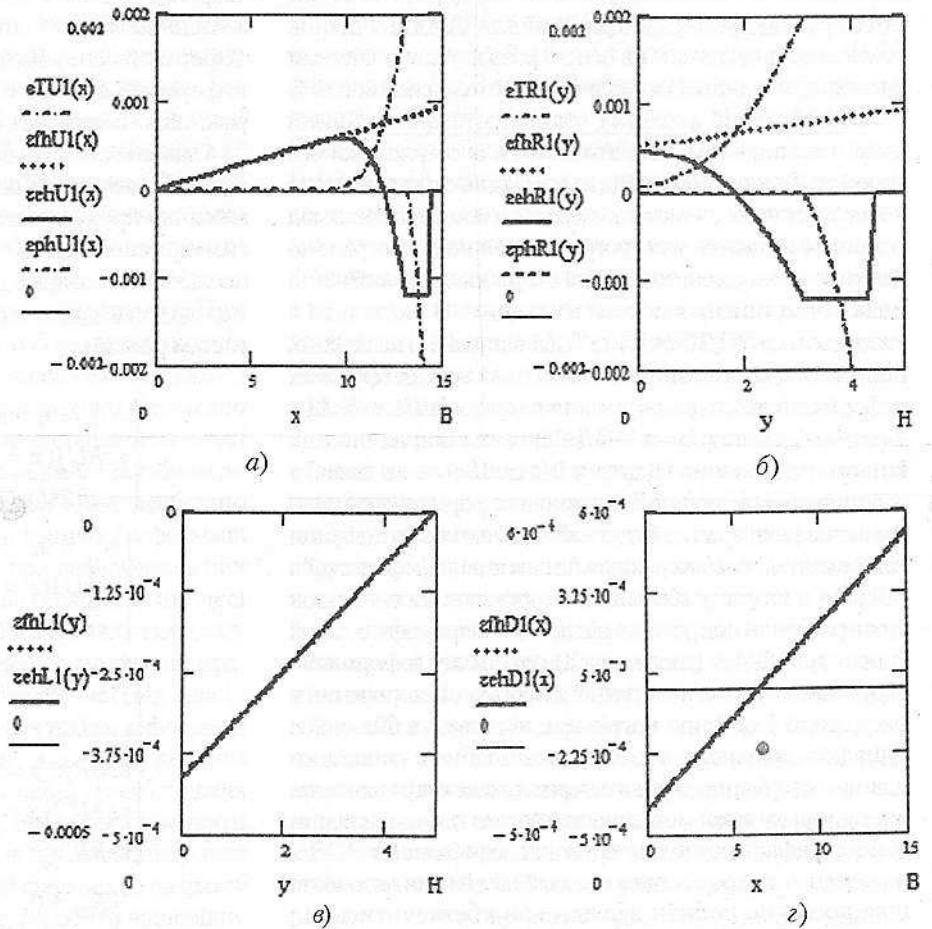


Рис. 2. Деформації на стадії нагрівання при зварюванні шва 1: а - на верхній полиці; б - на правій стінці; в - на лівій стінці; з - на нижній полиці

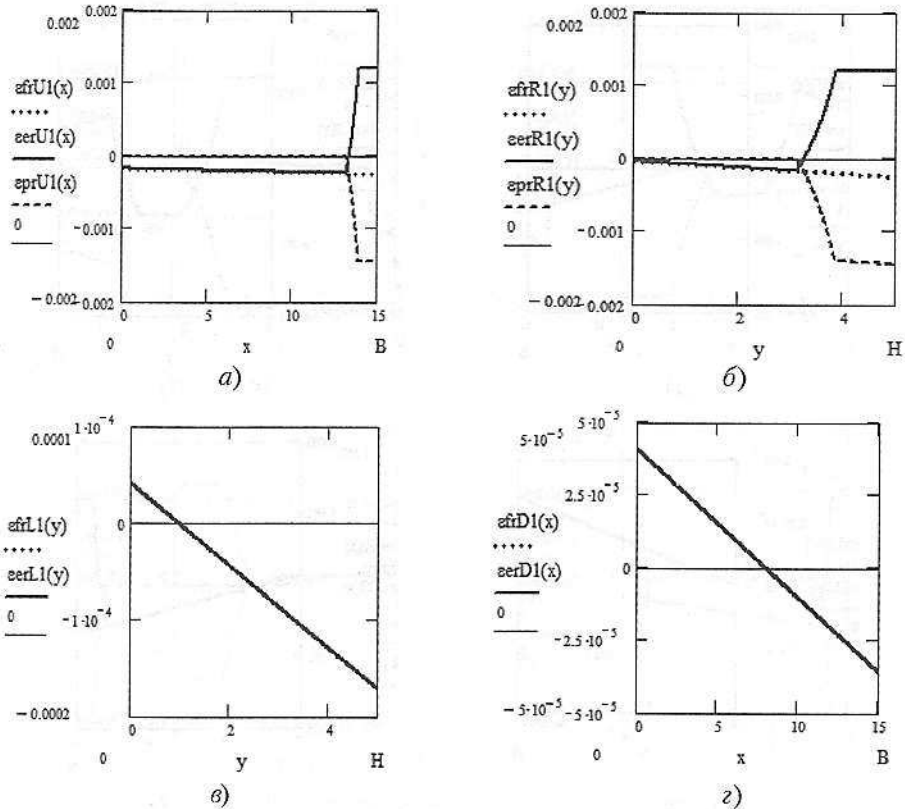


Рис. 3. Деформации в заливочном состоянии после заваривания шва 1: а - на верхней плечи; б - на правой стінці; в - на лівій стінці; г - на нижній плечи

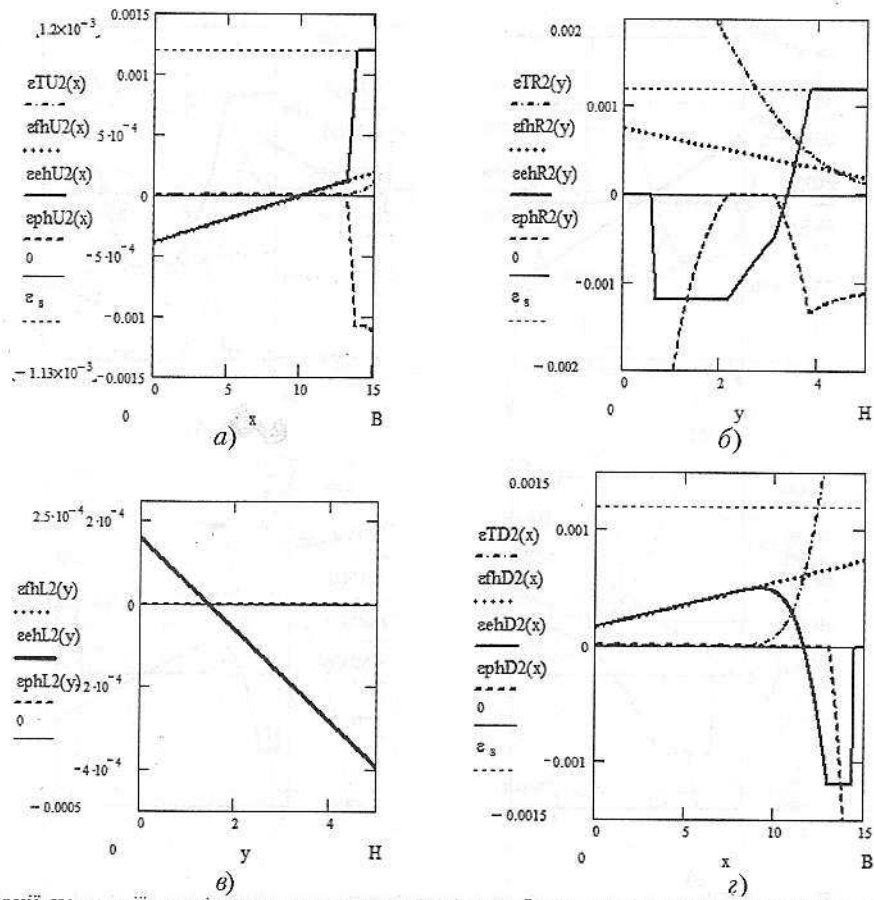


Рис. 4. Деформации на стадии нагрівання при завариванні шва 2: а - на верхній плечи; б - на правій стінці; в - на лівій стінці; г - на нижній плечи

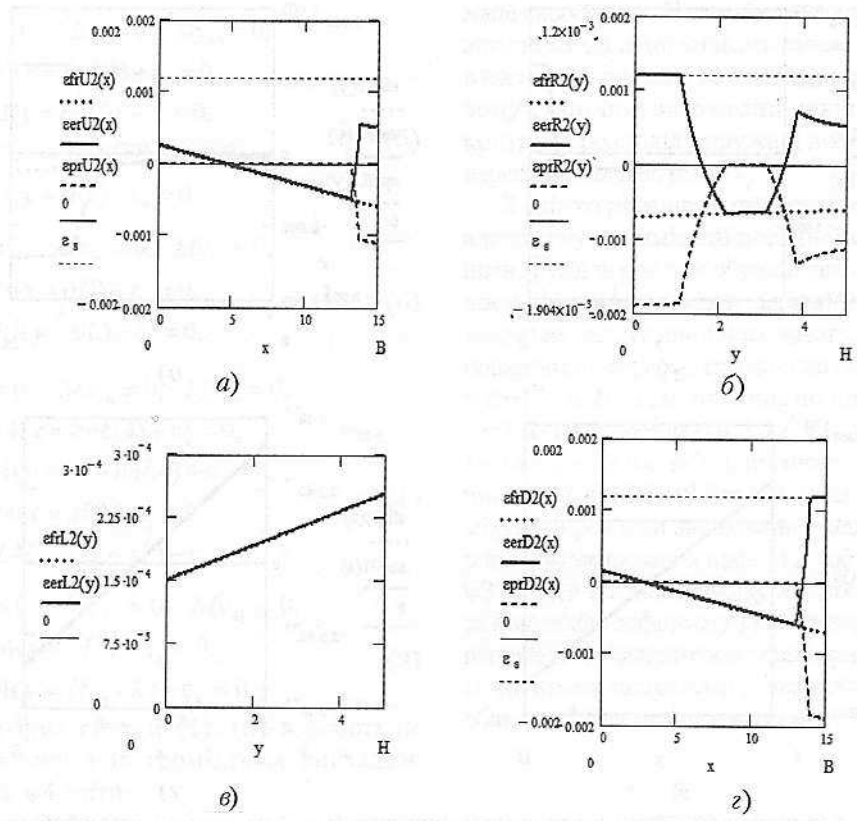


Рис. 5. Деформации в залишковом этапе после сваривания шва 2: а - на верхней поверхности; б - на правой стенке; в - на левой стенке; г - на нижней поверхности

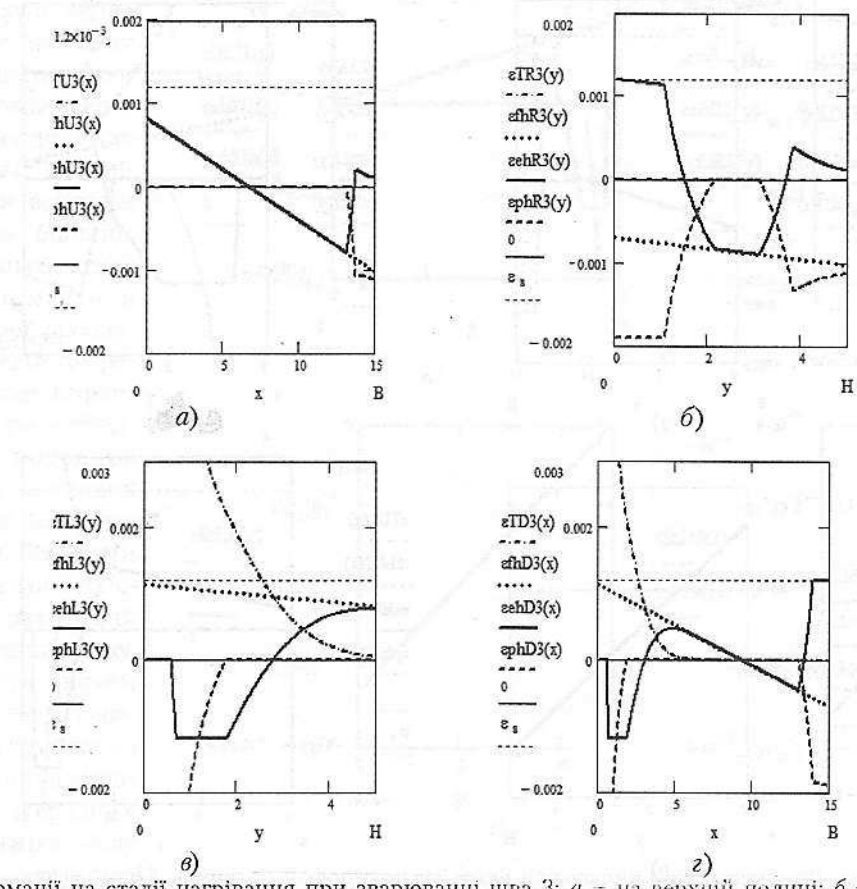


Рис. 6. Деформации на стадии нагревания при сваривании шва 3: а - на верхней поверхности; б - на правой стенке; в - на левой стенке; г - на нижней поверхности

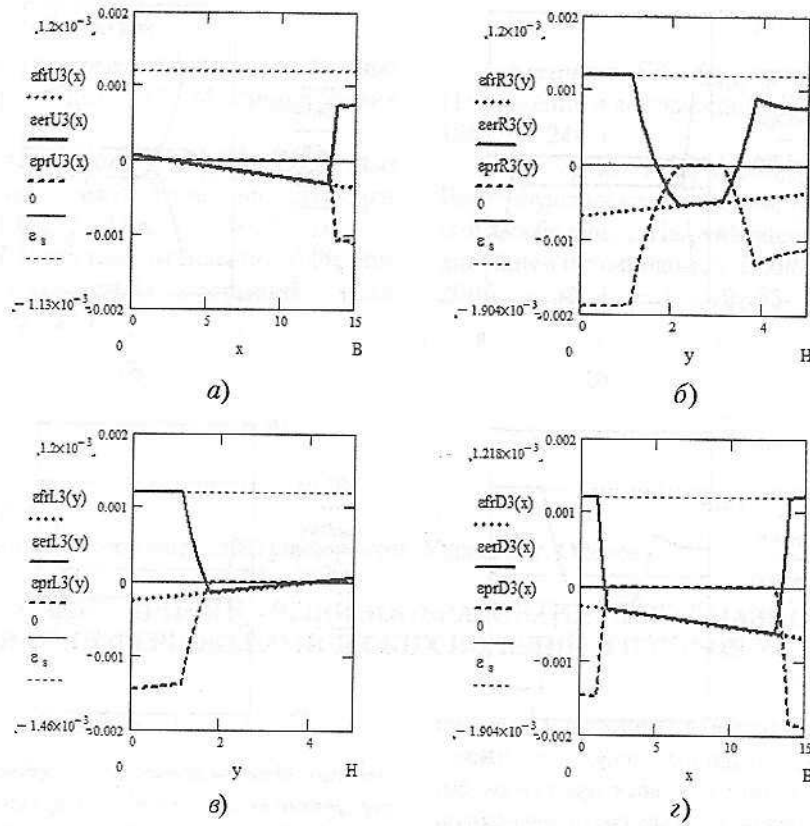


Рис. 7. Деформації в залишковому стані після зварювання шва 3: а - на верхній полиці; б - на правій стінці; в - на лівій стінці; г - на нижній полиці

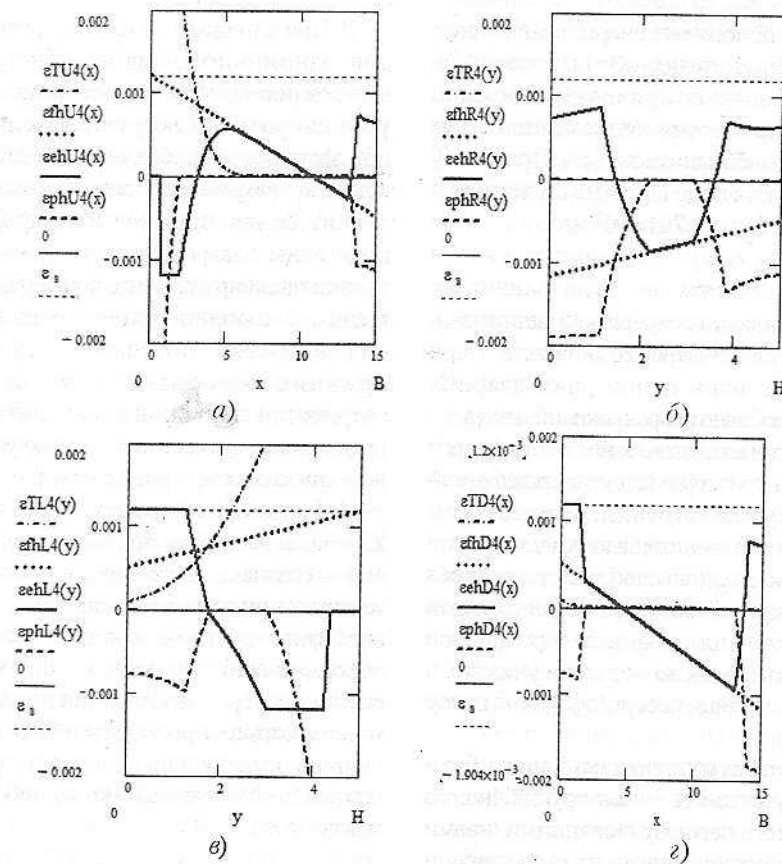


Рис. 8. Деформації на стадії нагрівання при зварюванні шва 4: а - на верхній полиці; б - на правій стінці; в - на лівій стінці; г - на нижній полиці



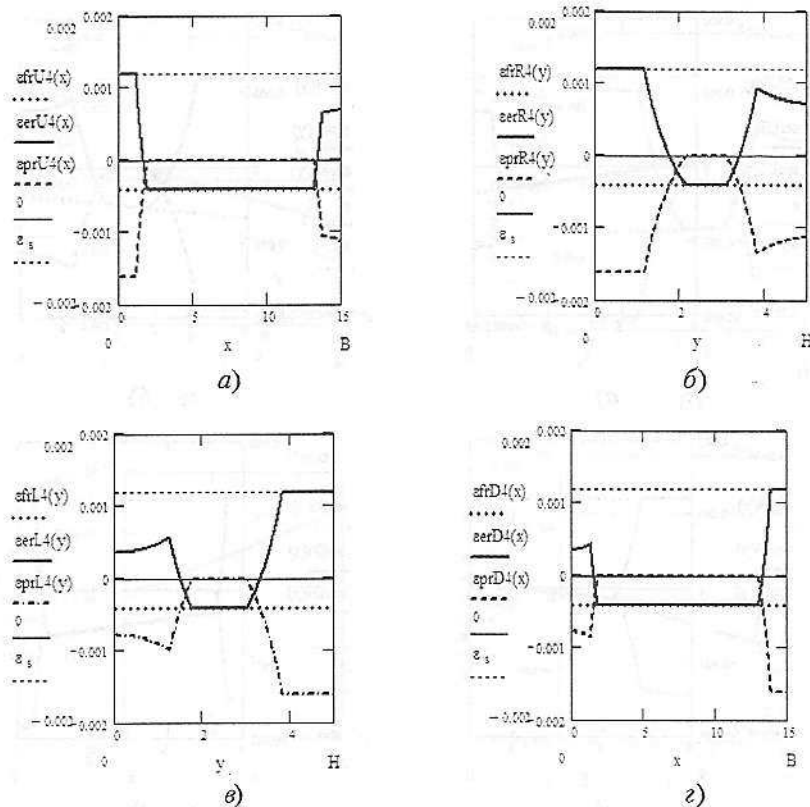


Рис. 9. Деформації в залишковому стані після зварювання шва 4: а – на верхній полиці; б – на правій стінці; в – на лівій стінці; з – на нижній полиці

Параметри оптимізації погонної енергії зварювання швів 3 і 4 відповідно мають значення  $\psi_3=1,03$ ,  $\psi_4=1,136$ . Отже, погонну енергію зварювання шва 3 необхідно збільшити на 3%, тобто, практично можна залишити без зміни, а шва 4 – необхідно збільшити на 14%. При цьому залишковий вигин стержня буде відсутнім, а усадочна сила від чотирьох швів  $P_{\mu c} = -1,761 \times 10^5$  н.

#### Висновки

1. На основі методу складних перерізів [5] для визначення залишкового напружено-деформованого стану при зварюванні поздовжніх швів одномірних зварних конструкцій вперше розроблено розрахунковий алгоритм оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги (третього і четвертого) за критерієм відсутності деформації залишкового прогину конструкцій з коробчатим поперечним перерізом, зумовленого дією усадочних сил від зварених швів. Характерною особливістю розробленого алгоритму є супутній моніторинг результатів розрахунку кінетики пружно-пластичних деформацій при зварюванні кожного шва, що дає можливість уникати, в межах точності методу складних перерізів [5], помилок у процесі розрахунку.

2. Розроблений алгоритм оптимізації може бути адаптований для одномірних зварних конструкцій іншого симетричного поперечного перерізу із зварними швами першої та другої черги, розташованими по різні сторони площини симетрії поперечного перерізу стержня.

3. При алгебраїзації рівнянь різних систем алгоритму для одномірних зварних конструкцій конкретних поперечних перерізів типовою помилкою початкової версії уявлень про механізм пружно-пластичного деформування при зварюванні послідовних (після першого) зварних швів є неврахування додаткової пластичної деформації в деяких зонах пластичних деформацій скорочення попередньо зварених швів і, як наслідок, перевищення залишковою пружною деформацією в цих зонах межі  $\epsilon_s$  після охолодження поточного шва. Наявність помилки контролюється поточним моніторингом розподілу пружних деформацій в елементах стержня при зварюванні швів і при необхідності перед остаточним розрахунком помилка оперативно усувається відповідною корекцією окремих рівнянь розрахункових систем.

4. Розрахунки показують, що незначне, в межах до 20%, перевищення пружною деформацією рівня  $\epsilon_s$  в окремих зонах пластичних деформацій скорочення або їх частинах при зварюванні деяких із швів мало впливає на величину розрахункових параметрів напружено-деформованого стану конструкцій і параметрів оптимізації погонної енергії зварювання швів другої черги, що дає можливість не проводити в таких випадках корекцію рівнянь розрахункової системи і тим самим зменшити відповідний обсяг додаткової роботи по розв'язуванню задачі.

## Література

1. *Винокуров В.А., Григорьянц А.Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

2. *Гатовский К.М., Кархин В.А.* Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.

3. *Махненко В.И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.

4. *Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М.* Напряжения и деформации при сварке. – К.: Вища шк., 1987. – 246 с.

5. *Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В.* Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстродействующим линейным источником // Технологические системы. – 2005. – № 4. – С. 49–55.

УДК 621.923

Усов А.В., Дубров К.А.

Одесский национальный политехнический университет. Украина, г. Одесса

### АНАЛИЗ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ФЕРРОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ

#### Анотація

*У статті досліджено технологічні методи зниження браку у виробництві феррокерамічних деталей, які використовуються у електромеханічному обладнанні. Крім того, розроблено модель, яка дозволяє оптимізувати технологічні параметри шліфування заготовок.*

#### Abstract

*Technological means of lowering the flaws percentage while producing ferroceraimical details, used in electromechanical machinery is researched. Besides this, the model that allows the technological parameters optimization of half-finished products sintering was made.*

Изделия из феррокерамики в силу широкого диапазона магнитных свойств в большом объеме используются в электроэнергетике – в генераторах, электроприводах, трансформаторах, и др. Благодаря уникальным сочетаниям электромагнитных свойств ферриты находят применение и в других областях техники. Объем их производства в мировом масштабе достиг десятков миллионов тонн в год и продолжает непрерывно увеличиваться. Поэтому весьма актуальным является совершенствование технологических процессов переработки отходов (в том числе и брака) ферритового производства, поскольку доля этих отходов достигает 30%. Переработка отходов в годные полуфабрикаты и изделия не только позволяет экономить сырьевые материалы, энергетические и трудовые ресурсы, но и способствует уменьшению нагрузки на окружающую среду [1].

Технологические потери связаны с потерей сырья, полуфабрикатов и годных изделий в результате несовершенства технологического процесса и технологического оборудования (негерметичность, отсутствие

системы улавливания, частые поломки и т.д.). Брак связан с отклонениями параметров полуфабрикатов и годных изделий выше допустимых значений. В целом брак подразделяется на два вида: устранимый и неустранимый. Переработка устранимого брака в годные полуфабрикаты и изделия обычно требует дополнительных операций, связанных с глубокими физико-химическими превращениями. Для переработки неустранимого брака необходимы дополнительные операции, связанные с измельчением и помолом, термообработкой, активированием путем химического модифицирования поверхности частиц и т.д. Технологические отходы связаны с образованием побочных продуктов на различных технологических операциях (рис. 1) (отходы формовочных масс, отходы шлифования и других видов механической обработки, отходы изделий после различных видов испытаний и т.д.), их также можно подразделить на два вида: утилизируемые в годные полуфабрикаты, утилизируемые в экологически безопасные формы.

Основное внимание исследователей уделялось обеспечению качественных характеристик ферритов на финишных методах [2,3].

В процессе обработки шлифованием феррокерамических изделий характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие их эксплуатационные свойства, а зачастую они приводят к последующей переплавке.

Выделяют следующие типы трещин при шлифовании материалов, предрасположенных к такому виду дефектов:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину /до 0,5–1,5 мм/;
- магистральные глубинные трещины / 1–10 мм/;
- подповерхностные замкнутые трещины.

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами