

М.В.Матвієнко¹, В.О.Мартиненко², Л.В.Вахоніна²

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН З'ЄДНУЮЧИХ ВУЗЛІВ З М'ЯКИМ ПРОМІЖНИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ДІЇ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

¹Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, просп. Ушакова, 44, м. Херсон, 73000, Україна;

²Миколаївський національний аграрний університет, вул. Георгія Гонгадзе, 9, м. Миколаїв, 54020, Україна;
e-mail: volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Abstract. A stress-strain state of the cylindrical junction with a soft intermediate layer under axial loading is considered under conditions of diffusion welding. The distribution and values of all component of the stresses and plastic deformations are studied using the computer simulation. The stiffness coefficients of the stress state and the degree of hardening of the soft interlayer are determined. The factors are found that must be taken into account when choosing the material of the interlayer and the parameters of the regime for diffusion welding.

Key words: diffusion welding, brazing, soft interlayer, the stress-strain state, the loading by compression.

Вступ.

Для підвищення якості з'єднань при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів, зокрема, металів з неметалами (керамікою, графітом), широко використовуються м'які прошарки з пластичних матеріалів з меншою, ніж у матеріалів, що з'єднуються, міцністю [8 – 10]. У паяних вузлах роль такого прошарку відіграє припій, який, як правило, має фізико-механічні властивості, відмінні від основного матеріалу. Однією з проблем, що виникають при цьому, є несуча здатність таких вузлів та їх напружено-деформований стан (НДС) у процесі з'єднання [1 – 3, 11].

1. Постановка задачі.

У раніше виконаних дослідженнях [5, 6] встановлено, що у вузлах з м'яким прошарком при осьовому навантаженні НДС у зоні з'єднання стає більш об'ємним, еквівалентні напруження в матеріалі м'якого прошарку зменшуються, а в міцнішому основному матеріалі навпаки – збільшуються. Це дозволило підтвердити раніше відомий факт зміцнення м'якого прошарку [1 – 3, 11]. При цьому моделювався лише один варіант, коли прикладене навантаження (40 МПа) трохи перевищувало межу течії (38 МПа) матеріалу прошарку [4].

З метою вивчення поведінки м'якого прошарку зі збільшенням навантаження у цій роботі виконано комп'ютерне моделювання при навантаженнях, які значно перевищують межу течії матеріалу прошарку, що має товщину 1 мм.

2. Метод та побудова розв'язку.

Комп'ютерне моделювання виконувалося методом скінченних елементів, реалізованим в комп'ютерному комплексі ANSYS, для циліндричних вузлів, фізична (а) та скінченно елементна (б) моделі яких показані на рис. 1. У зв'язку із специфікою, у

вигляді великих градієнтів напружень у вузькій зоні поблизу прошарку, використовувалася градієнтна розбивка зі зменшенням розміру скінченного елемента поблизу й у самому прошарку. Розміри скінчених елементів вибирались таким чином, щоб по товщині прошарку їх було не менше 20. Властивості матеріалів вибирались так, щоб пластично деформувався лише матеріал прошарку (таблиця). Коефіцієнти Пуассона для матеріалів, що з'єднуються, і прошарки приймалися однаковими: 0,3 при пружному і 0,5 при пластичному деформуванні. Як умова появи пластичних деформацій у роботі прийнято критерій Мізеса $\sigma_{\text{eq}} = \sigma_{0,2}$, де $\sigma_{0,2}$ – умовна границя течії; σ_{eq} – еквівалентні напруження, що визначаються за Мізесом для задачі таким рівнянням

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \times \sigma_y - \sigma_y \times \sigma_z - \sigma_z \times \sigma_x + 3 \times \tau_{xy}^2}.$$

Вивчалася НДС вузла для трьох варіантів осьового стискаючого навантаження: 100 МПа (варіант 1), 150 МПа (варіант 2) та 200 МПа (варіант 3). Очевидно, що отримані при такому навантаженні результати є вірними і при зміні стиску на розтяг, знаки напруження та деформації при цьому зміняться на протилежні.

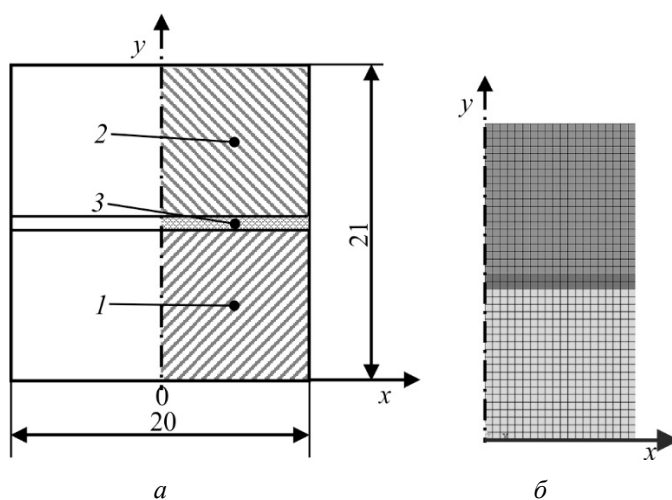


Рис. 1

Матеріал	Межа течії, МПа	Модуль зміцнення при пластичному деформуванні, МПа	Модуль пружності, МПа
Матеріали, що з'єднуються (1 і 2)	>200	–	$2 \cdot 10^5$
Прошарок (3)	100	$2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$

3. Аналіз результатів та приклади.

Аналізувалися поля та епюри всіх складових напружень та пластичних деформацій у вузлах. Як показав аналіз результатів моделювання, характер НДС в цілому відповідає загальним принципам механіки та закономірностям, встановленим раніше [2, 5, 6].

Рівномірність розподілу напружень у вузлі порушується, при цьому найбільш помітно в безпосередній близькості від межі поділу матеріалів і прошарку. До осьових стискаючих напружень, прикладених до вузла, додаються радіальні та колові нормальні та дотичні напруження, НДС стає більш об'ємним. Найбільшою мірою нерівномірність розподілу вздовж з'єднання виражена з боку матеріалів, що з'єднуються, які мають більшу жорсткість і міцність, ніж матеріал прошарку.

Епюри радіальних напружень в основному матеріалі (а) і в м'якому прошарку (б), що з'єднує матеріали, відображено на рис. 2. З них добре видно, що при всіх варіантах навантаження радіальні розтягувальні напруження в основному матеріалі від незначних в середній частині з'єднання зростають до його периферії. При цьому рівень зростання залежить від величини прикладеного осевого навантаження.

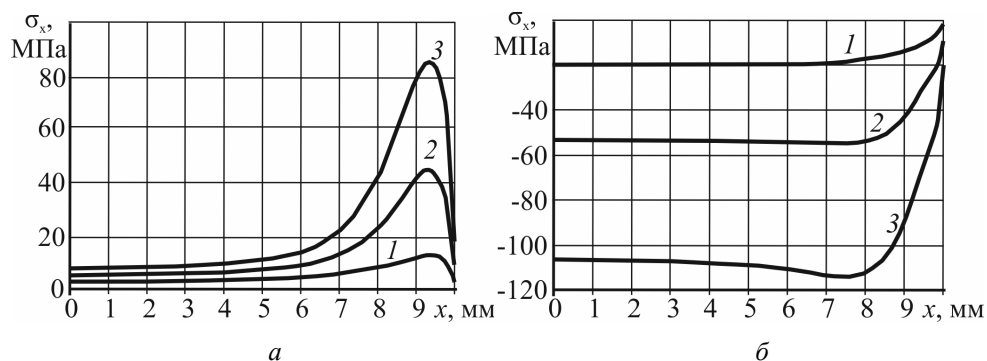


Рис. 2

При збільшенні навантаження та появі пластичних деформацій у прошарку вони суттєво зростають від 3, 7 та 10 МПа у середній частині з'єднання у варіантах 1, 2 та 3, що становить не більше 5% від прикладених осевих, до 17, 45 та 85 МПа поблизу зовнішнього краю з'єднання, що становить 17, 30 та 42% від прикладених осевих навантажень, відповідно, у варіантах 1, 2 та 3 (рис. 2, а).

У матеріалі прошарку радіальні напруження, навпаки, є стискаючими (рис. 2, б), їх рівень за модулем вищий, ніж у матеріалах, що з'єднуються, і розподілені вони більш рівномірно, змінюючись на більшій частині ширини (близько 80%) з'єднання в межах 20, 55 та 110 МПа, тобто 20, 37 та 55% від прикладених осевих навантажень у варіантах навантаження 1, 2 та 3, відповідно (рис. 2, б).

Як видно з епюр, наведених на рис. 3 (радіальні напруження вздовж осі (а) і в середній частині (б) вузла), в поперечному до з'єднання напрямку радіальні напруження в матеріалах, що з'єднуються, зменшуються до нуля в міру віддалення від з'єднання. По товщині прошарку вони розподілені майже рівномірно.

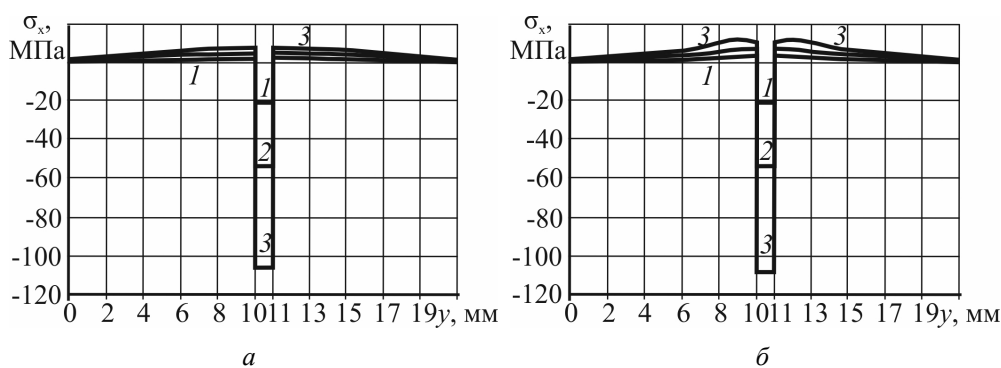


Рис. 3

Колові напруження в матеріалах, що з'єднуються, вздовж з'єднання розподілені аналогічно радіальним, але рівень їх трохи нижчий. Максимальні значення їх становлять 11, 35 і 75 МПа, тобто 11, 23 і 37% у варіантах 1, 2 і 3, відповідно. При віддаленні від з'єднання вони також швидко зменшуються до нуля. У матеріалі прошарку ці на-

пруження за розподілом і величиною також аналогічні радіальним, змінюючись в межах 21, 60 і 120 МПа у варіантах 1, 2 і 3, відповідно.

Судячи з полів осьових напружень при різних варіантах навантаження їх рівень далеко від з'єднання і на більшій його частині (рис. 4, *a*) практично не відрізняється від прикладеного тиску. Тільки в невеликій зоні на периферії з'єднання, в порівнянні з товщиною прошарку, напруження змінюються, що стає більш помітним при збільшенні прикладеного тиску. Це добре видно на епюрах осьових напружень по з'єднанню з м'яким прошарком (*a*) і по твірній вузла (*б*), наведених на рис. 4. Так, при тиску 100 МПа (вар. 1) вони в основному металі підвищуються до 105 МПа (рис. 4, *a*), а в прошарку знижуються до 80 МПа (рис. 4, *б*). При навантаженні 150 і 200 МПа (вар. 2 і 3) це напруження збільшується до 173 і 234 МПа в основному металі і зменшується до 101 і 99 МПа у прошарку (рис. 4, *б*).

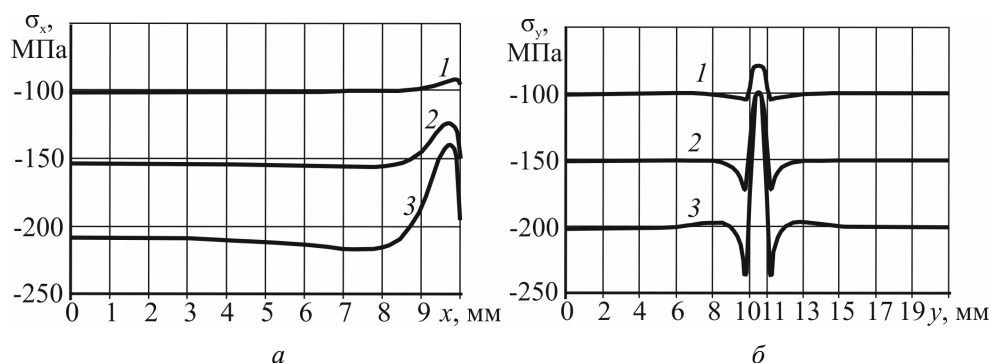


Рис. 4.

Аналіз полів дотичних напружень всіх варіантів прикладеного тиску показав їх наявність лише біля краю з'єднання. Характер їх розподілу вздовж з'єднань прошарку з основними матеріалами вузла (*a*) та (*б*) показаний на рис. 5. На більшій частині з'єднання (близько 70%) в середній частині вони відсутні, з'являючись і різко зростаючи на периферії до 8, 23 і 50 МПа у варіантах 1, 2 і 3, що становить 8, 15 і 25% від доданих осьових, відповідно.

Таким чином, найменшої величини всі складові напружень (крім осьових) досягають за відсутності пластичних деформацій, коли проявляється вплив лише різниці жорсткостей (модулів пружності) матеріалів і прошарку (варіант 1). З появою пластичних деформацій вони збільшуються (варіант 2) і зростають зі збільшенням навантаження і, відповідно, пластичних деформацій (варіант 3).

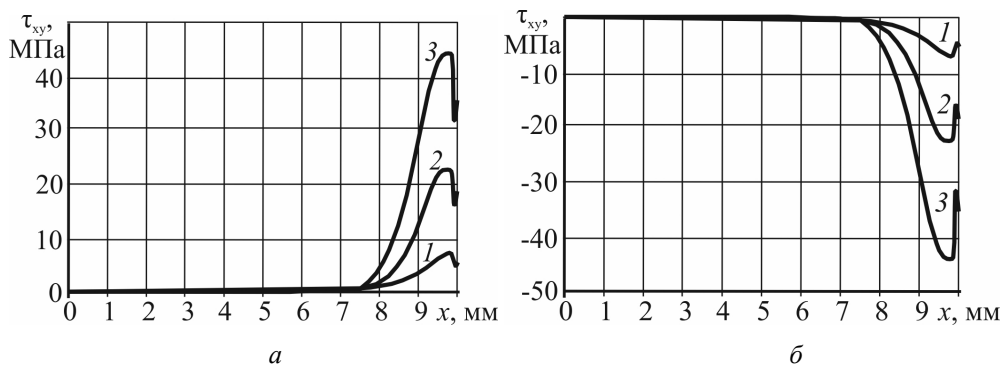


Рис. 5

Відповідно до окремих складових розподілено й еквівалентні напруження. Як видно з епюр, показаних на рис. 6, на більшій частині з'єднання в матеріалах еквівалентні напруження змінюються в межах, які близькі і дещо перевищують прикладений тиск: 100 ... 110 (до 10%), 155 ... 180 (до 20%), 220 ... 250 МПа (до 25% прикладеного тиску) у варіантах 1, 2 та 3, відповідно (рис. 6, а).

У матеріалі прошарку ці напруження розподілені більш рівномірно, залишаючись на більшій частині з'єднання на рівні 80 МПа, тобто нижче за прикладений тиск у варіанті 1 і збільшуючись до 100 МПа, до рівня межі течії матеріалу прошарку у варіантах 2 і 3 (рис. 6, б).

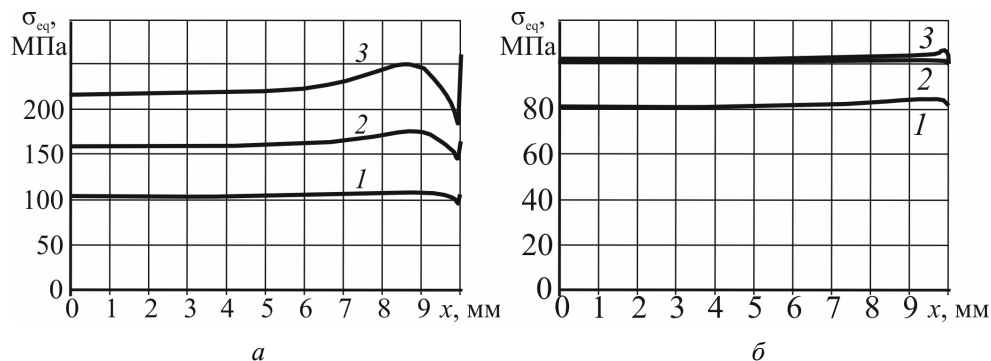


Рис. 6

Тобто, за відсутності пластичних деформацій (варіант 1) еквівалентні напруження в матеріалі прошарку нижчі за прикладені, які є рівні межі течії матеріалу прошарку, на 20%, а при збільшенні навантаження і, відповідно, появи пластичних деформацій, вони знижуються ще більше – на 33% (варіант 2) та 50% (варіант 3).

Таким чином, ефект зміцнення (розвантаження, зменшення еквівалентних напружень) м'якого прошарку визначається як меншою його жорсткістю (великими пружними деформаціями), так і меншою міцністю матеріалу (пластичними деформаціями).

У напрямку осі вузла еквівалентні напруження у всіх варіантах (1, 2 і 3) розподілені рівномірно по товщині прошарку, стрибкоподібно збільшуються у з'єднаннях матеріалів, а потім поступово зменшуються до нуля в міру віддалення від з'єднання (рис. 7).

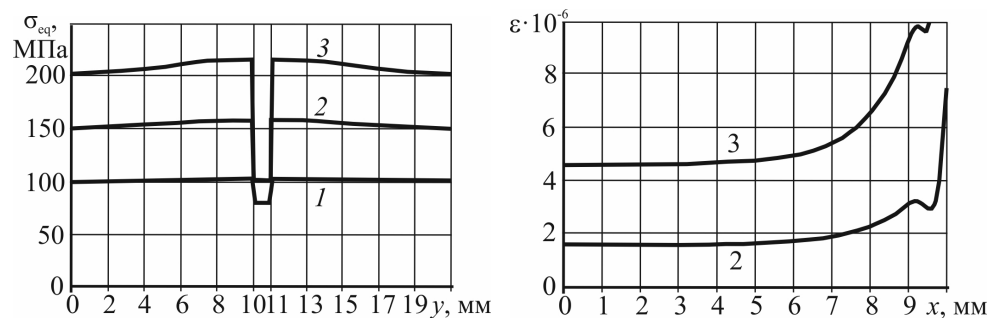


Рис. 7

Рис. 8

Величина пластичної деформації матеріалу прошарку мала. Вона практично стала в середній частині прошарку ($1,56 \cdot 10^{-6}$ і $4,55 \cdot 10^{-6}$ у варіантах 2 і 3, відповідно) і значно збільшується на периферії до $7,5 \cdot 10^{-6}$ та $20 \cdot 10^{-6}$ (рис. 8). Це свідчить про те, що зміцнення прошарку у середній частині виражено більше, ніж на периферії.

Ефект зміцнення матеріалу м'якого прошарку залежить від так званої жорсткості напруженого стану. Кількісною характеристикою при цьому може бути коефіцієнт жорсткості [7], рівний відношенню максимальних (за модулем) основних напружень (у нашому випадку осьового стиснення вузла) до еквівалентних, тобто $\kappa_{ж} = \sigma_3 / \sigma_{eq}$.

Цей коефіцієнт жорсткості напруженого стану визначає ступінь та характер зміни міцності та пластичності матеріалу. Зі зменшенням коефіцієнта жорсткості ($\kappa_{ж} < 1$) пропорційно зменшується величина межі течії та збільшується відносне подовження, які визначаються при випробуваннях на розтяг в умовах лінійного напруженого стану ($\kappa_{ж} = 1$). Тобто, відбувається зміцнення матеріалу, знижується його міцність і збільшується пластичність.

Зі збільшенням коефіцієнта жорсткості ($\kappa_{ж} > 1$) навпаки, межа течії (міцність) зростає, а відносне подовження (пластичність) зменшується, тобто відбувається зміцнення, збільшується міцність і зменшується пластичність матеріалу. У стані, близькому до всебічного рівномірного розтягування, коли $\sigma_{eq} \rightarrow 0$, а $\kappa_{ж} \rightarrow \infty$, межа течії досягає рівня справжньої межі міцності, відносне подовження знижується до нуля, метал руйнується крихко без пластичних деформацій.

Природно, що в умовах дифузійного зварювання, коли максимальні (за модулем) головні напруження – стискаючі, небезпека руйнування відсутня. У цьому випадку основним є фактор збільшення міцності та зменшення пластичності м'якого прошарку, що знижує її роль в утворенні (формуванні) зварного з'єднання: вирівнювання нерівностей, заповнення несучільностей та інших процесів, що визначають якість з'єднання.

Для визначення коефіцієнта жорсткості напруженого стану матеріалу м'якого прошарку було проаналізовано характер поля максимальних за модулем головних напружень σ_3 . Як видно із епюр (рис. 9), ці напруження вздовж з'єднання в матеріалах, що з'єднуються (рис. 9, а) на більшій частині (80 ... 90%) з'єднання розподілені рівномірно і за величиною наближаються до прикладеного з'єднання, дещо перевищуючи його за рахунок пластичного деформування (наклепу) матеріалу прошарку (варіанти 2 і 3) та збільшення радіального та осьового напружень. На периферії, навпаки, вони знижуються до 130 і 150 МПа у випадках 2 і 3, відповідно.

У матеріалі прошарку основні максимальні напруження (рис. 9, б) розподілені аналогічно – на більшій частині з'єднання рівномірно на тому ж рівні, а на периферії з'єднання знижуються до 90, 125 і 135 МПа у варіантах 1, 2 і 3, відповідно.

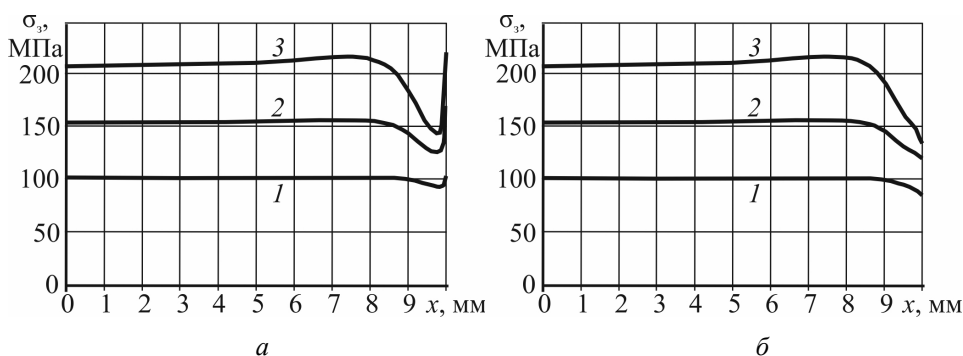


Рис. 9.

Відповідно до розподілу еквівалентних (рис. 6) і максимальних головних напружень (рис. 9) змінюються і коефіцієнти жорсткості напруженого стану $\kappa_{ж} = \sigma_3 / \sigma_{eq}$ у зоні з'єднання, як з боку прошарку (рис. 10, а), так і з боку матеріалів, що з'єднуються (рис. 10, б).

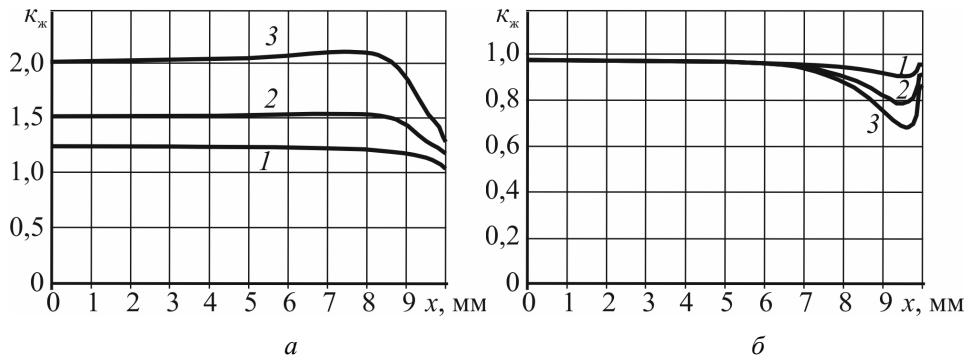


Рис. 10.

У прошарку коефіцієнт жорсткості напруженого стану, залишаючись практично постійним на більшій його частині (близько 80%), істотно змінюється зі збільшенням навантаження (рис.10, а). При малому навантаженні (100 МПа) та відсутності пластичних деформацій коефіцієнт жорсткості напруженого стану залишається на рівні $\kappa_{ж} = 1,23$, що вище, ніж при лінійному напруженому ($\kappa_{ж} = 1$) стані. Тобто, різниця модулів пружності м'якого прошарку і матеріалів, що з'єднуються, створює невелике зміцнення прошарку за рахунок різниці пружних деформацій.

При збільшенні навантаження та появи пластичних деформацій у матеріалі прошарку характер розподілу коефіцієнта жорсткості напруженого стану зберігається, але рівень його збільшується до 1,51 (при навантаженні 150 МПа) та 2,1 (при навантаженні 200 МПа). Відповідно зростає і рівень зміцнення матеріалу прошарку.

У зовнішньої кромки коефіцієнт жорсткості зменшується до 1, 1,25 і 1,35 у варіантах 1, 2 і 3, відповідно, і ступінь зміцнення знижується, напружений стан наближається до лінійного.

У жорсткому і міцному основному матеріалі у зоні з'єднання коефіцієнт жорсткості напруженого стану, навпаки, дещо знижується (рис. 10, б). На більшій частині з'єднання (близько 70 %) при всіх навантаженнях він залишається на рівні, близькому до 1 (0,95 ... 0,99), зменшуючись на периферії до 0,9 (при навантаженні 100 МПа), 0,8 (при 150 МПа) та 0,68 (при 200 МПа). Тобто, поблизу м'якого прошарку основний метал кілька разів зміцнюється (знижується його межа течії і збільшується пластичність), що найбільш помітно на периферії з'єднання.

Висновок.

Наявність м'якого прошарку у вузлі змінює характер напруженого стану. Поблизу прошарку він стає більш об'ємним, до доданих осьових додаються радіальні, колові та дотичні напруження, всі складові напружень помітно зростають зі збільшенням навантаження.

Відповідно змінюється коефіцієнт жорсткості напруженого стану, що викликає ефект розвантаження або зміцнення прошарку та довантаження або розміцнення основного матеріалу.

Ефект зміцнення м'якого прошарку (коефіцієнт жорсткості його напруженого стану) визначається як меншою жорсткістю його матеріалу (великими пружними деформаціями), так і меншою його міцністю (пластичними деформаціями). У всіх розглянутих варіантах навантажень у матеріалі м'якого прошарку коефіцієнт жорсткості більше 1, тобто матеріал прошарку зміцнюється. При цьому тим більшою мірою, чим більше прикладене навантаження. В результаті середнє значення коефіцієнта жорсткості напруженого стану, а відповідно, і ступінь зміцнення, зростає з 1,23 (100 МПа) до 1,51 (150 МПа) та 2,1 (200 МПа). На більшій частині ширини з'єднання (близько 80 %) жорсткість напруженого стану матеріалу прошарку практично не змінюється і

лише на периферійних ділянках, порівнянних з товщиною прошарку, вона знижується, наближаючись до лінійного напруженого стану ($\kappa_{ж} = \sigma_3 / \sigma_{eq} = 1$).

У ділянках з'єднання матеріалів, що прилягають до м'якого прошарку, протилежна картина – коефіцієнт жорсткості на більшій частині ширини з'єднання зі збільшенням навантаження знижується. Матеріал розміцнюється, пластичність його (якщо матеріал здатний пластично деформуватися) відповідно збільшується, найбільш помітно це на периферії з'єднання, на ширині близько двох товщин прошарку.

Таким чином, ефект зміцнення м'якого прошарку обумовлений зниженням рівня еквівалентних напружень за рахунок створення об'ємного напруженого стану. При цьому підвищується жорсткість напруженого стану, в результаті ускладнюються пластичні деформації, підвищується межа течії і знижується пластичність матеріалу прошарку. Це необхідно враховувати при виборі матеріалу прошарку та режиму дифузійного зварювання, а також при оцінці міцності таких вузлів.

РЕЗЮМЕ. Розглянуто напружено-деформований стан циліндричних вузлів з м'яким проміжним прошарком при навантаженні осьовим навантаженням в умовах дифузійного зварювання. Методом комп'ютерного моделювання досліджено розподіл і значення всіх складових напружень і пластичних деформацій. Визначено коефіцієнти жорсткості напруженого стану і ступінь зміцнення м'якого прошарку. Вказано фактори, які необхідно враховувати при виборі матеріалу прошарку і параметри режиму при дифузійному зварюванні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дифузійне зварювання, пайка, м'який прошарок, напружено-деформований стан, навантаження при стиску.

1. Бакиш О.А., Качанов Л.М. О напряженном состоянии пластичной прослойки при осесимметричной деформации // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 2. – С. 134 – 137.
2. Бакиш О.А., Шрон Р.З. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3 – 5.
3. Бакиш О.А., Шрон Р.З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 6 – 10.
4. Ермолаев Г.В., Колесар И.А. Напряженно-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой // Автоматическая сварка. – 2014. – 734, № 8. – С. 23 – 27.
5. Квасницький В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка // Зб. наукових праць нац. ун-ту кораблебудування. – 2007. – 416, № 5. – С. 57 – 65.
6. Квасницький В.В., Ермолаев Г.В., Колесар И.А. Напружено-деформований стан зварних та спаяних з'єднань різнорідних матеріалів однакової жорсткості з проміжними прошарками // Зб. наукових праць нац. ун-ту кораблебудування. – 2011. – 440, № 5. – С. 36 – 43.
7. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2010. – 464 с.
8. Акса Е., Gursel А. The importance of interlayers in diffusion welding – A review // Periodicals of Engng. and Natural Sci. – 2015. – 3, N 2. – P. 12 – 16.
9. Borts В.В., Korotkova I.M., Lopata O.T., Sytin V.I., Tkachenko V.I., Vorobiov I.O. Method of solid-phase welding of austenitic and oxide-dispersion-strengthened steels // Materials Sci. – 2017. – 53, N 2. – P. 165 – 170.
10. Shmorgun V., Bogdanov A., Trunov M., Taube A. Investigation on Thermal Stress-Strain State in Multilayered Composites during Nickel Aluminide Coatings Formation // WSEAS Transactions on Appl. and Theoretical Mech. – 2015. – 10. – P. 180 – 186.
11. Zhou Y., Ikeuchi K., North T.H., Wang Z. Effect of plastic deformation on residual stresses in ceramic/metal interfaces // Metallurgical Transactions A. – 1991. – 22A. – P. 2822 – 2825.

Надійшла 06.12.2021

Затверджена до друку 13.12.2022