

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.12

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-9-20

Максим Болотов, Геннадій Болотов, Ірина Прибисько, Олег Новомлинець

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДИФУЗІЙНО-ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ, ОТРИМАНИХ ПРИ НАГРІВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

*Актуальність теми дослідження.* На сьогодні тліючий розряд середніх тисків знайшов значне поширення в різних технологічних процесах хіміко-термічної обробки, нанесення покриттів, зварювання і паяння завдяки можливості регулювання теплових впливів у широких межах.

*Постановка проблеми.* Однак поряд зі сприятливими передумовами виявили і недоліки, здебільшого пов'язані зі складнощами зварювання в полі нормального тліючого розряду деталей, що суттєво відрізняються за теплофізичними властивостями, що зумовлено особливостями теплового впливу при підвищених тисках газу в робочій камері.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Показано, що тліючий розряд, який горить у порожнистому катоді, забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії, що забезпечує можливість отримання надійних металокерамічних дифузійно-зварних з'єднань.

*Мета роботи.* Метою цієї роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні з'єднань із різнорідних матеріалів, що виникає під час нагрівання в нормальному тліючому розряді та тліючому розряді, ініційованому в порожнистому катоді.

*Виклад основного матеріалу.* Шляхом комп'ютерного моделювання в програмному пакеті ANSYS v.16.0 здійснено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану дифузійно-зварних теплофізично «тонких» та «масивних» деталей у процесі нагрівання в полі нормального тліючого розряду та розряду в порожнистому катоді.

*Висновки відповідно до статті.* Встановлено, що при нагріванні теплофізично «масивних» різнорідних тіл у плазмі НТР утворюється несприятливий НДС із рівнем напружень, що на 19% перевищує межу витривалості кераміки. Такий вузол функціонувати не може. Водночас під час зварювання в ТРПК рівень напружень, що виникають у «масивних» з'єднаннях не перевищує допустимий.

*Ключові слова:* тліючий розряд; напружено-деформований стан; газорозрядна плазма; дифузійне зварювання.

*Рис.: 13. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** У сучасній техніці дедалі більшого поширення набувають вироби з нових спеціальних біметалевих, металокерамічних, склометалічних композиційних матеріалів, що забезпечують роботу конструкції в надскладних експлуатаційних умовах (висока температура, тиск, агресивність середовища, абразивний знос тощо). Створення виробів із таких матеріалів стає більш масовим, але наявні методи й обладнання для їх виготовлення не завжди дозволяють забезпечити достатній рівень їхньої якості та надійності.

На сьогодні для отримання таких вузлів значного поширення набули методи зварювання тиском із підігрівом, найбільш технологічним серед яких виявилось саме дифузійне зварювання. Велике різноманіття форм виробів і сполучення матеріалів, що з'єднуються, зумовило застосування різних джерел нагрівання для дифузійного зварювання (радіаційне, індукційне, електроконтактне, газорозрядне в плазмі тліючого розряду).

У роботах [1; 2] показано, що застосування іонного нагрівання плазмою нормального тліючого розряду дозволяє розширити технологічні властивості дифузійного зварювання різнорідних матеріалів, що дає змогу розробляти принципово нові конструкційні матеріали.

Досвід застосування тліючого розряду середніх тисків у промислових умовах показав, що завдяки технологічним можливостям і високій економічній ефективності він є дуже ефективним джерелом нагрівання під час дифузійного зварювання виробів малих і середніх габаритів [3; 4; 5] з однорідних і різнорідних матеріалів.

**Постановка проблеми.** В умовах зварювального нагрівання тліючий розряд проявляє себе як джерело з нормальним розподілом теплового потоку в катодній плямі розряду [6] із максимумом концентрації в точках, найбільш наближених до анода (рис. 1).

Однак підвищення тиску газу в робочій камері призводить до збільшення густини розрядного струму  $i$ , відповідно, інтенсивності зварювального нагрівання. Джерело нагрівання при цьому з нормально-смугового стає зосередженим кільцевим. У таких умовах концентрованої дії теплового потоку виникають певні складнощі в процесі зварювання вузлів із матеріалів, що суттєво відрізняються за теплофізичними властивостями. Нагрівання таких вузлів зосередженим джерелом теплоти, унаслідок різниці теплопровідності металевих та неметалевих матеріалів, неминуче призведе до появи градієнта температур на їхніх поверхнях. При зварюванні металів із неметалами це є в жодному разі неприпустимо. Оскільки за умови відсутності пластичних властивостей у кераміки, така нерівномірність нагрівання стає причиною появи значних залишкових об'ємних напружень, здатних призвести до їхнього руйнування.

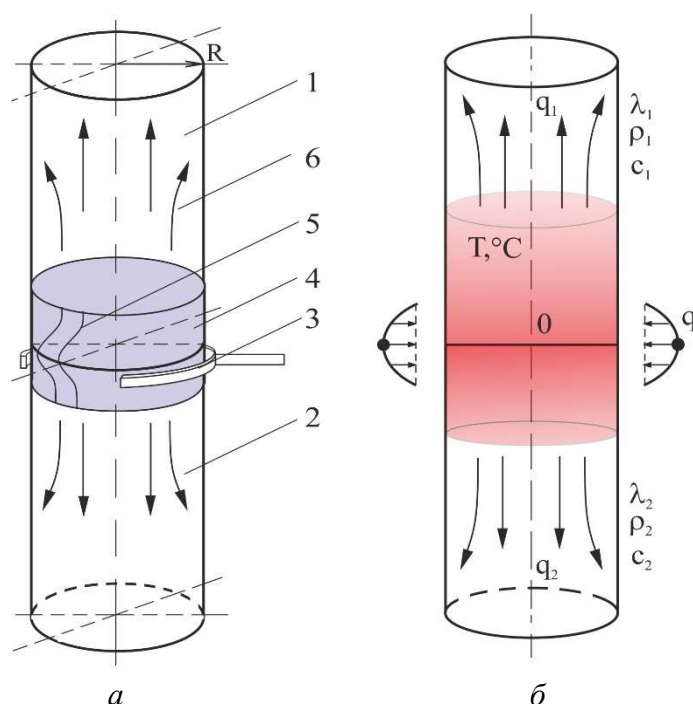


Рис. 1. Схема нагрівання (а) та характер розподілу температури в зоні контакту (б) при нагріванні в плазмі нормального тліючого розряду:

- 1, 2 – деталі, що зварюються; 3 – контурний анод; 4 – зона нагрівання (катодна пляма);  
5 – розподіл густини струму; б – розповсюдження тепла;  $q$  – потужність розряду;  
 $c_p$  – об'ємна теплоємність матеріалу;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Водночас у роботах [7; 8], що тліючий розряд ініційований у порожнистому катоді в умовах зварювального нагрівання забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії по поверхнях деталей, що зварюються. Оскільки при нагріванні в тліючому розряді з порожнистим катодом зразки, що зварюються, є електронейтральними і розміщуються в іонізованій плазмі області негативного тліючого світіння (рис. 2), що локалізується всередині катодної порожнини, то вся їхня бічна поверхня буде піддаватися інтенсивному бомбардуванню потоками швидких електронів, емітованих із поверхні катоду внаслідок іонно-електронної емісії й розігнаних в області катодного падіння потенціалів. Наведені в роботі [9] результати досліджень локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання показують, що характер розподілу густини електронного струму по поверхнях зварних деталей близький до рівномірного з осьовим відхиленням не більше ніж

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

на 20 %, що дає підставу вважати тліючий розряд, що горить у порожнистому катоді, рівномірно розподіленим джерелом теплоти.

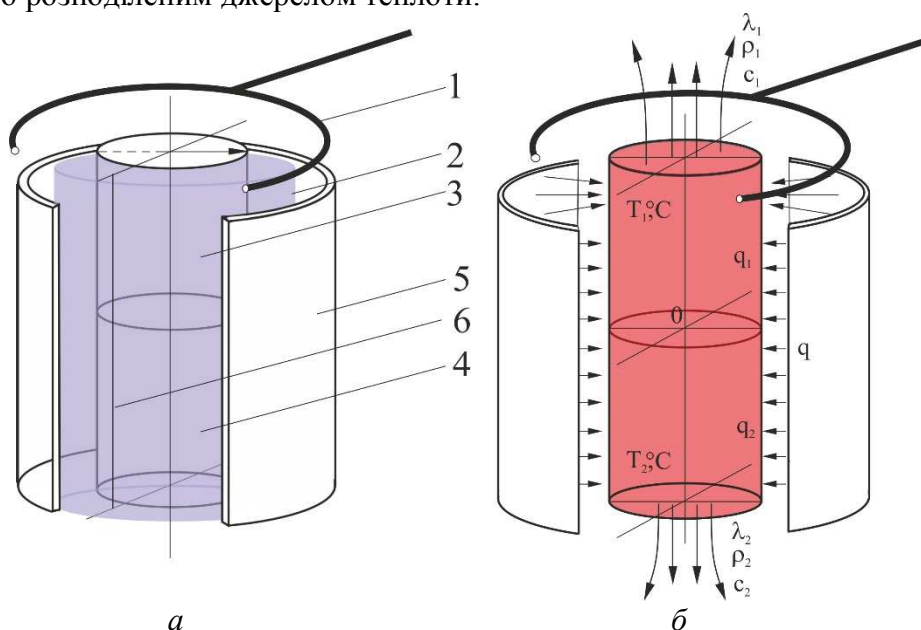


Рис. 2. Схема нагрівання (а) та характер розподілу температури в зоні контакту (б) при нагріванні в плазмі тліючого розряду ініційованого в порожнистому катоді:  
1 – анодне кільце; 2 – від’ємне тліюче світіння; 3,4 – деталі, що зварюються; 5 – порожнистий катод;  
б – розподіл густини струму по поверхнях зварюваних деталей;  $q$  – потужність розряду;  
 $c_p$  – об’ємна теплосмність матеріалу;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу

**Мета роботи.** Метою даної роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні з’єднань із різнорідних матеріалів, що виникає при нагріванні в нормальному тліючому розряді і тліючому розряді, ініційованому в порожнистому катоді. Для аналізу використовувалося комп’ютерне моделювання на базі методу скінчених елементів із застосуванням програмного пакета ANSYS v.16.0.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження здійснювали для металокерамічних (ВСт3сп+ЦТС-19) вузлів із неузгодженими теплофізичними властивостями. Так, величина ТКЛР для досліджуваних пар зразків може бути прийнятою такою, що відрізняється на  $13 \cdot 10^6$  град $^{-1}$ .

Моделювали НДС, що виникає в дифузійно-зварних неузгоджених з’єднаннях в процесі їх охолодження на 200 °С від температури зварювання (900 °С). Як моделі були обрані вузли циліндричної форми діаметром 10 мм, висотою 15 мм та діаметром 30 мм, висотою 30 мм. У першому випадку виріб можна віднести до теплофізично «тонких» тіл, для яких величина критерія Біо повинна відповідати такій умові:  $Bi < 0,1 \dots 0,12$  [10] (у нашому випадку  $Bi \approx 0,09$ ). У другому випадку виріб відноситься до теплофізично «масивних» тіл, оскільки величина критерію Біо становила вже  $Bi \approx 0,2$ , що є вище зазначеного діапазону. Загальний вигляд досліджуваних моделей представлено на рис. 3.

Моделювання нагрівання в плазмі нормального тліючого розряду здійснювали за умови застосування кільцевого контурного аноду діаметром 20 та 40 мм завтовшки 5 мм. Нагрівання в ТРПК забезпечували катодом діаметром 40 та 60 мм заввишки 40 мм. Таким чином, відстань від бічної поверхні виробу до стінки катода (анода для НТР) зберігалася на постійному рівні і становила для нормального ТР 5 мм, для ТРПК – 15 мм. Зміну траєкторії руху іонів та електронів під дією електричного поля в моделі не враховували. Отже, вважали, що нагрівання здійснюється спрямованим по нормалі до поверхні виробу джерелом теплоти.

Для зменшення напружень, що виникають при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів із різним ТКЛР, застосовували проміжні прошарки із безолов'яної бронзи Брб-1 завтовшки 0,2 та 1 мм, що мають високий рівень пластичності та виконують функцію своєрідних демпферів, тим самим гасячи виникаючі термонапруження.

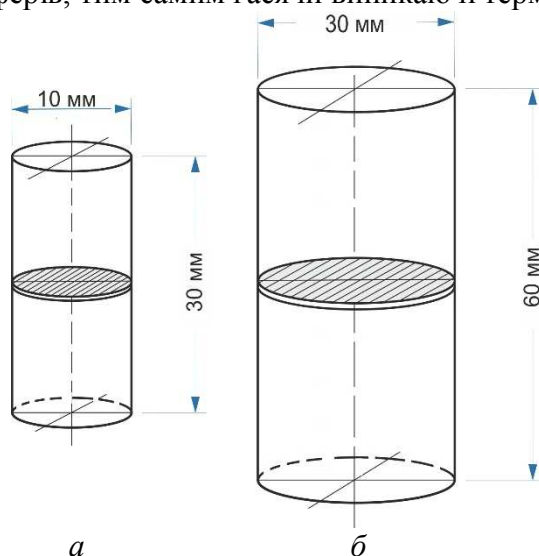


Рис. 3. Моделі досліджуваних типів з'єднань теплофізично «тонких» тіл (а) та теплофізично «масивних» тіл (б)

У модель заносилися параметри режимів зварювання, встановлені експериментальним шляхом і детально описані в [11]. Швидкість охолодження вузлів приймали рівною  $V_{ох} = 5$  К/хв. Як було вищезазначено, складність отримання дифузійно-зварних з'єднань із неузгоджених матеріалів, до яких відносяться металокерамічні з'єднання, полягає в різкій відмінності їхніх теплофізичних властивостей. Значна різниця ТКЛР більшості металів і кераміки при майже повній відсутності пластичних властивостей в останній робить цей вузол дуже чутливим до перепаду температур як у процесі нагрівання під зварювання, так і в процесі охолодження.

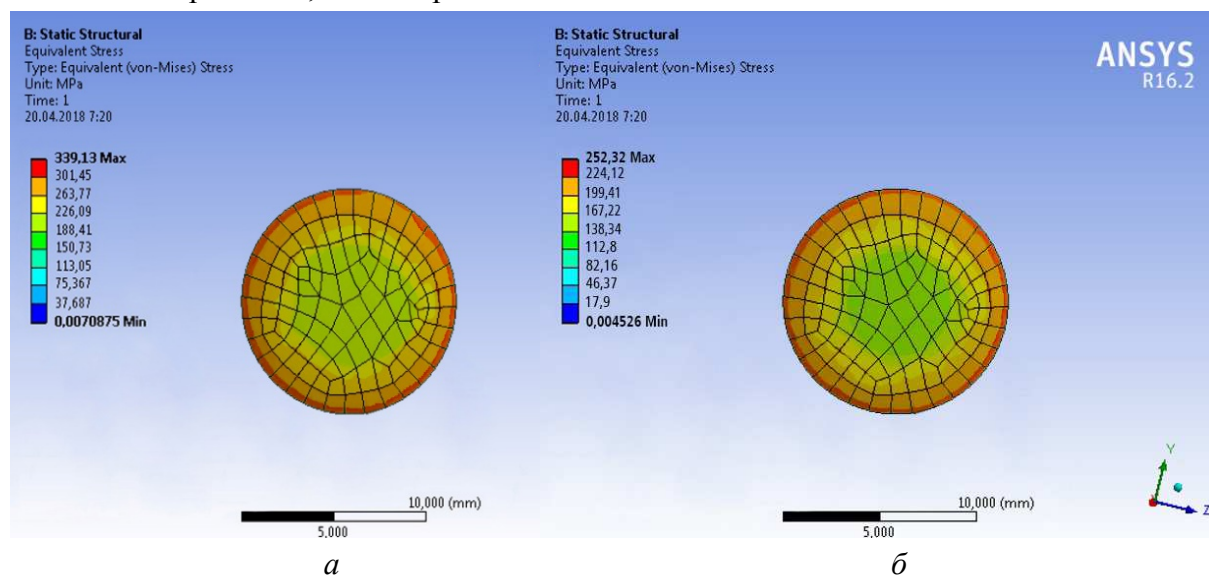


Рис. 4. Поле еквівалентних напружень на стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 10 мм при нагріванні в полі нормального тліючого розряду (а) та в тліючому розряді з ефектом порожнистого катода (б)

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Змодельовано НДС таких з'єднань за умови їх нагрівання в плазмі нормального тліючого розряду і розряду, що горить у порожнистому катоді та наступному охолодженні. Отримані в процесі моделювання поля напружень (рис. 4) та епюри еквівалентних напружень (рис. 5) неузгоджених теплофізично «тонких» тіл при зварюванні в НТР і в ТРПК свідчать, що металокерамічні зварні з'єднання характеризуються складним об'ємним напружено-деформованим станом із помітною неоднорідністю розподілу полів напружень у зоні стику.

Максимальні значення еквівалентних напружень у зоні стику знаходяться в межах норми і становлять 339 МПа для НТР та 252 МПа для ТРПК і локалізуються по краях заготовки. Із наближенням до центра їх значення поступово зменшуються до мінімальних 188...138 МПа для НТР та ТРПК відповідно.

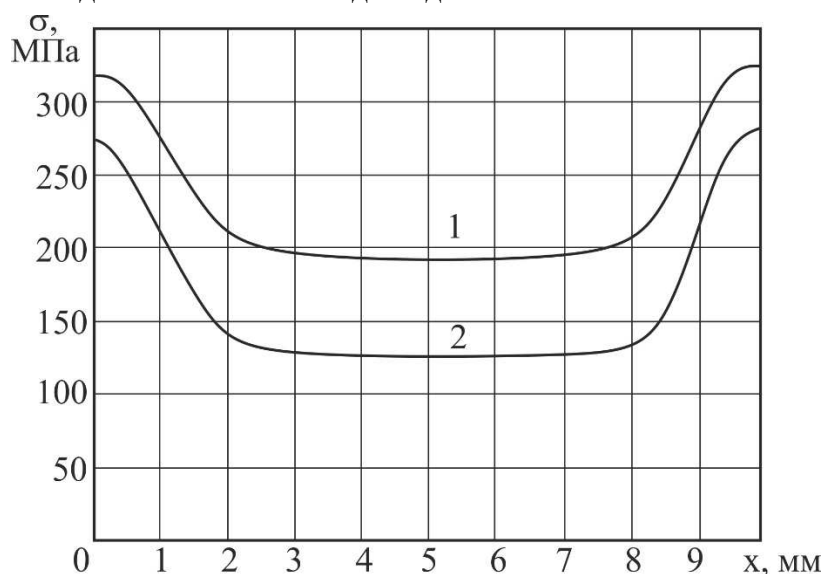


Рис. 5. Епюри еквівалентних напружень по стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 10 мм виконаних у нормальному тліючому розряді (1) та в тліючому розряді із порожнистим катодом (2)

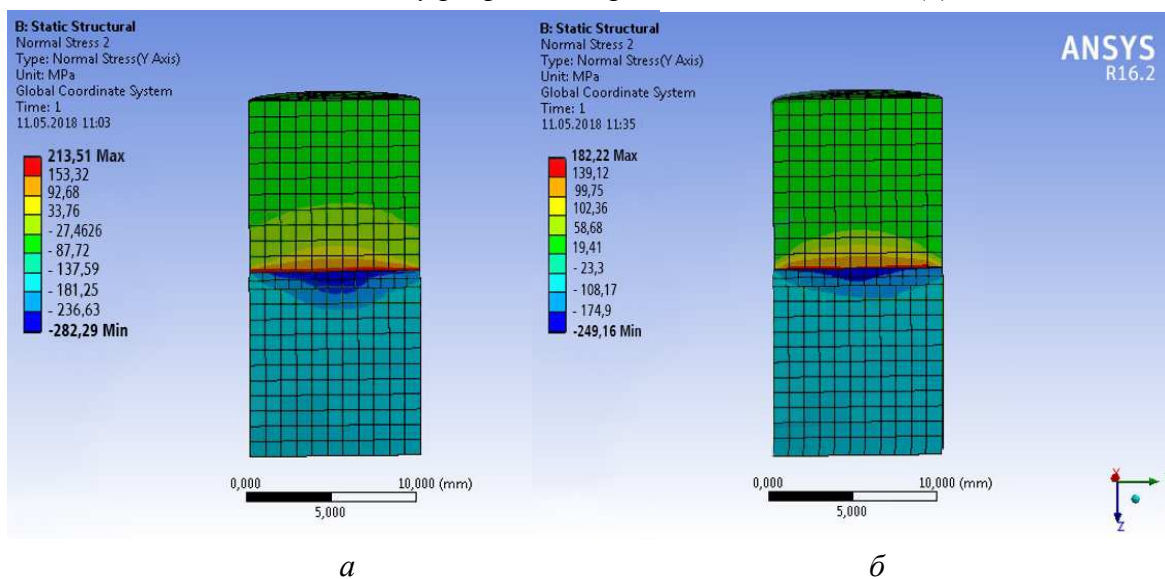


Рис. 6. Поля осьових напружень, що виникають у теплофізично «тонких» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

Аналіз осьових напружень, що виникають при охолодженні металокерамічного з'єднання до 700 °С, тобто на 200 °С від температури зварювання, поля яких наведені



на рис. 6, показує, що їх розподіл у матеріалах носить майже рівномірний характер зі збільшенням до максимуму їхніх значень біля зварного стику. Це кількісно ілюструє епюра осьових термонапружень, що наведена на рис. 7. Такий розподіл осьових напружень є найбільш оптимальним із погляду деформаційної активації процесу масопереносу, оскільки в цій області рівень пластичних деформацій буде найбільшим.

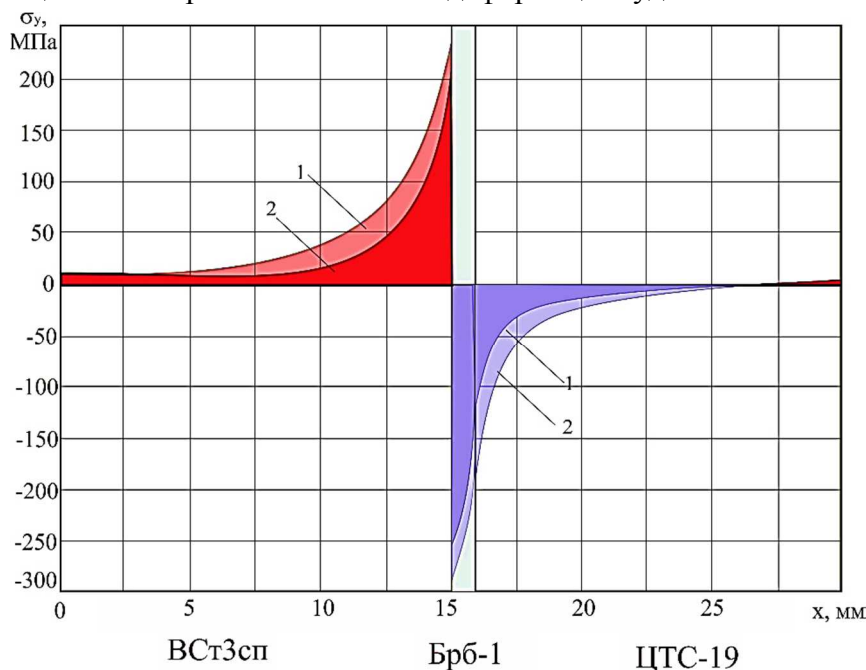


Рис. 7. Епюри осьових напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «тонких» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

Отримані епюри осьових напружень у металокерамічному з'єднанні показують, що основним місцем локалізації осьових термонапружень є зварний стик (металевий прошарок), максимальні значення яких знаходяться на рівні -249...-282 МПа для ТРПК та НТР відповідно. Ці напруження не є критичними (руйнівними), оскільки тимчасовий опір на розтяг (стиск) матеріалу прошарку (Брб-1) становить 600 МПа. Знак мінус вказує на характер напружень, у цьому випадку це стиск, що не є характерним для металевих матеріалів, оскільки при охолодженні в них виникають, переважно напруження розтягу. Такий ефект може бути наслідком впливу на матеріал прошарку більш жорсткого матеріалу з яким вона контактує – керамікою. Авторами [12] встановлено, що при охолодженні дифузійно-зварного з'єднання з матеріалів різної жорсткості в менш жорсткому матеріалі біля стику буде формуватися напружений стан близький до всебічного стиску. Це припущення є справедливим, оскільки при охолодженні більш жорсткий матеріал (у нашому випадку п'єзокераміка), піддаючись впливу саме стискаючих напружень, буде намагатись стиснути матеріал із меншою жорсткістю (у нашому випадку бронза). Максимальні значення осьових напружень, що виникають при цьому, у п'єзокераміці знаходяться в межах -181 МПа для НТР та -108 МПа для ТРПК. Однак навіть такі значення осьових напружень не становить небезпеки для працездатності металокерамічного «тонкого» вузла, оскільки межа витривалості п'єзокераміки на стиск – 294 МПа.

Метал піддається дії розтягуючих напружень, максимальні значення яких також сконцентровані в області стику з розкриттям біля бічної поверхні виробу. Значення таких напружень не перевищують 213 МПа для НТР та 182 МПа для ТРПК.

Необхідно зазначити, що загальний рівень напружень, що виникає в теплофізично «тонкому» металокерамічному з'єднанні при зварюванні в ТРПК, у середньому на 20...25 % нижче, ніж у НТР. Більш складна картина НДС виникає в теплофізично «ма-

сивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих дифузійним зварюванням у плазмі НТР та ТРПК. Поля еквівалентних напружень, що виникають у зоні зварного стику, наведено на рис. 8.

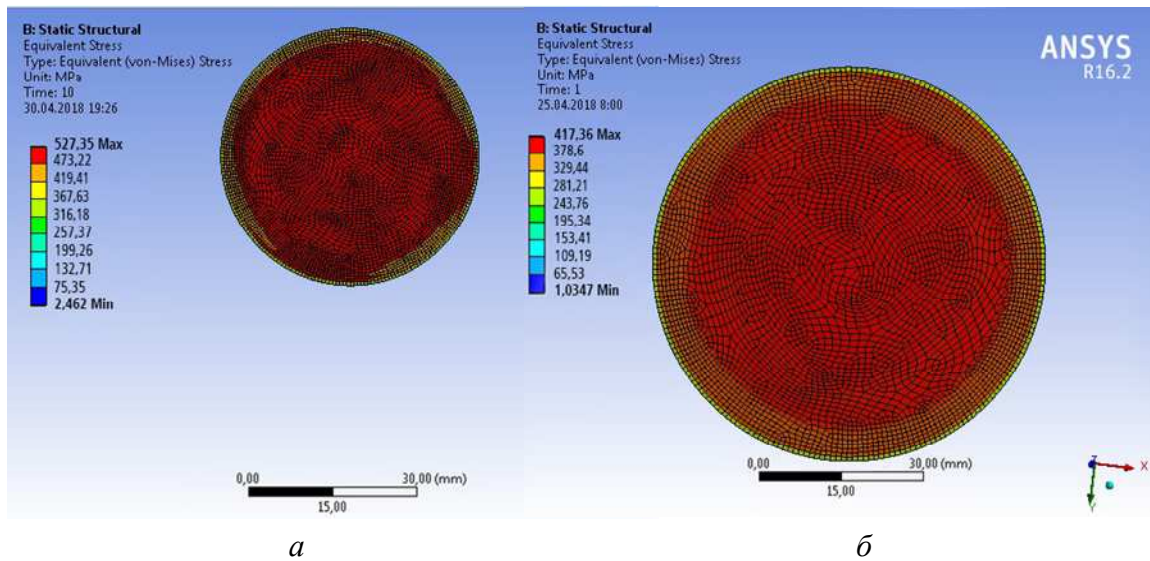


Рис. 8. Поле еквівалентних напружень в стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 30 мм при нагріванні в полі нормального тліючого розряді (а) та в тліючому розряді з ефектом порожнистого катода (б)

Отримані в процесі моделювання поля та епюри еквівалентних напружень, наведені на (рис. 9), показують, що в межах стику максимальні напруження розподілені майже рівномірно із деяким зниженням по краях заготовки. Максимальні значення еквівалентних напружень у стику знаходяться в межах допустимих і становлять 527 для НТР та 417 для ТРПК, що в середньому на 36...40 % перевищують ті ж самі, отримані при зварюванні теплофізично «тонких» тіл. Поля розподілу осьових напружень (рис. 10) та епюри осьових напружень (рис. 11), що виникають у «масивному» тілі, показують, що основним концентратором напружень є зварний стик із максимумом напружень на рівні -562 МПа для НТР та -418 МПа для ТРПК. Для матеріалу прошарку ці напруження не становлять небезпеки, але є небезпечними для п'єзокераміки.

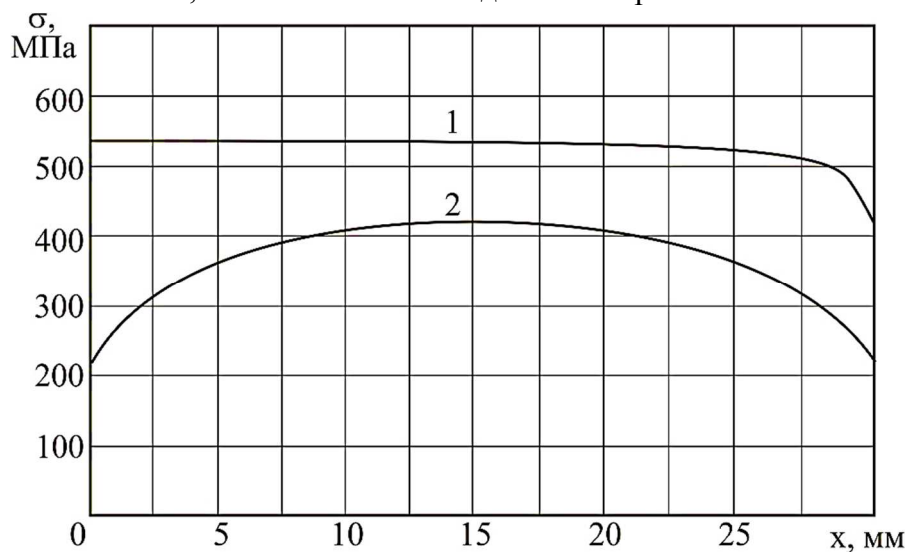


Рис. 9. Епюри еквівалентних напружень по стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 30 мм виконаних у нормальному тліючому розряді (1) та в тліючому розряді з порожнистим катодом (2)

Так, при зварюванні «масивних» металокерамічних з'єднань осьові напруження, що виникають у ЦТС, знаходяться на рівні -361 МПа для НТР, що на 19 % перевищує межу тимчасового опору матеріалу на стиск (-294 МПа) і ймовірно стануть для вузла руйнівними, та -278 МПа для ТРПК, що не перевищує порогового значення. У металевому матеріалі осьові напруження знаходяться в межах допустимих і становлять 276...329 для ТРПК та НТР відповідно.

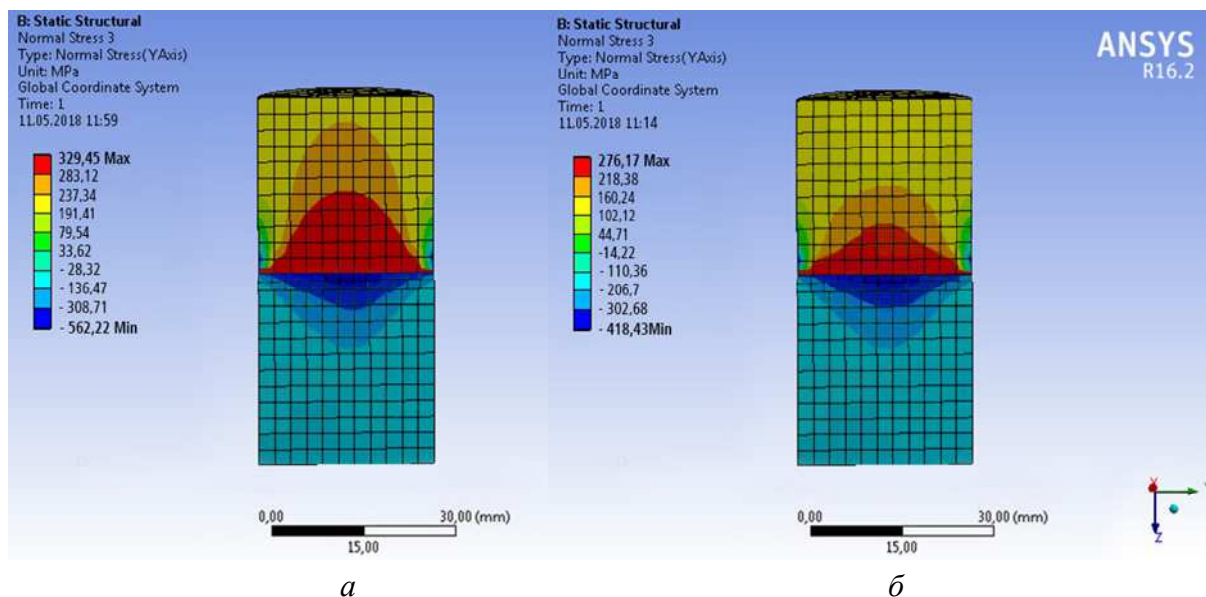


Рис. 10. Поля осьових напружень, що виникають у теплофізично «масивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

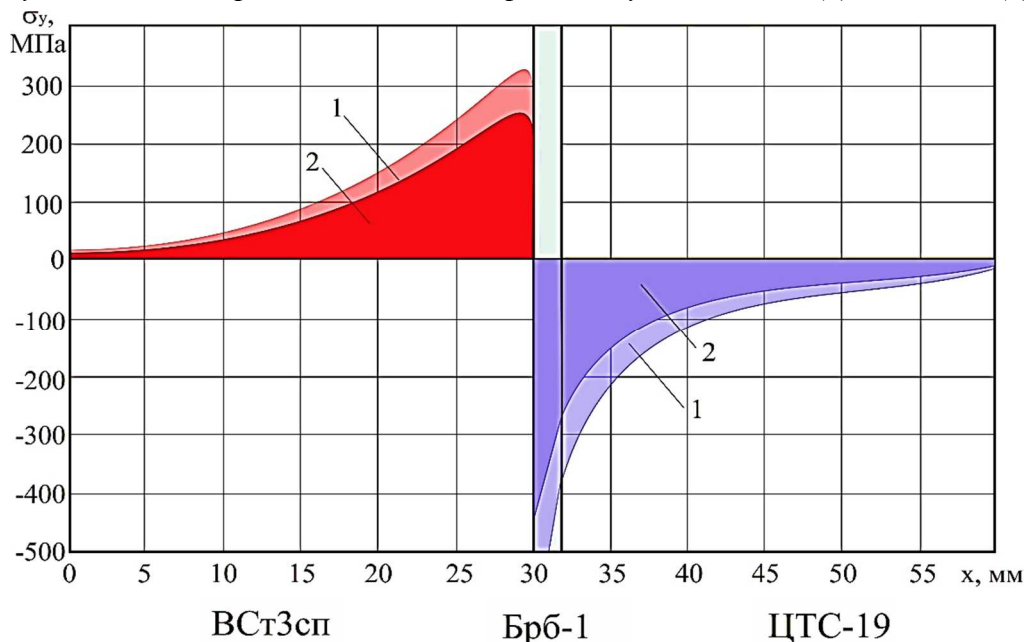


Рис. 11. Епюри осьових напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «масивних» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

Для більш повного розуміння картини напружено-деформованого стану, що виникає в області сполучення різнорідних матеріалів, були досліджені й дотичні (зсуваючі) напруження, оскільки вони відіграють чи не найголовнішу роль у процесах деформаційної активації більш твердої поверхні [13]. Поля цих напружень для НТР та ТРПК наведено на рис. 12.



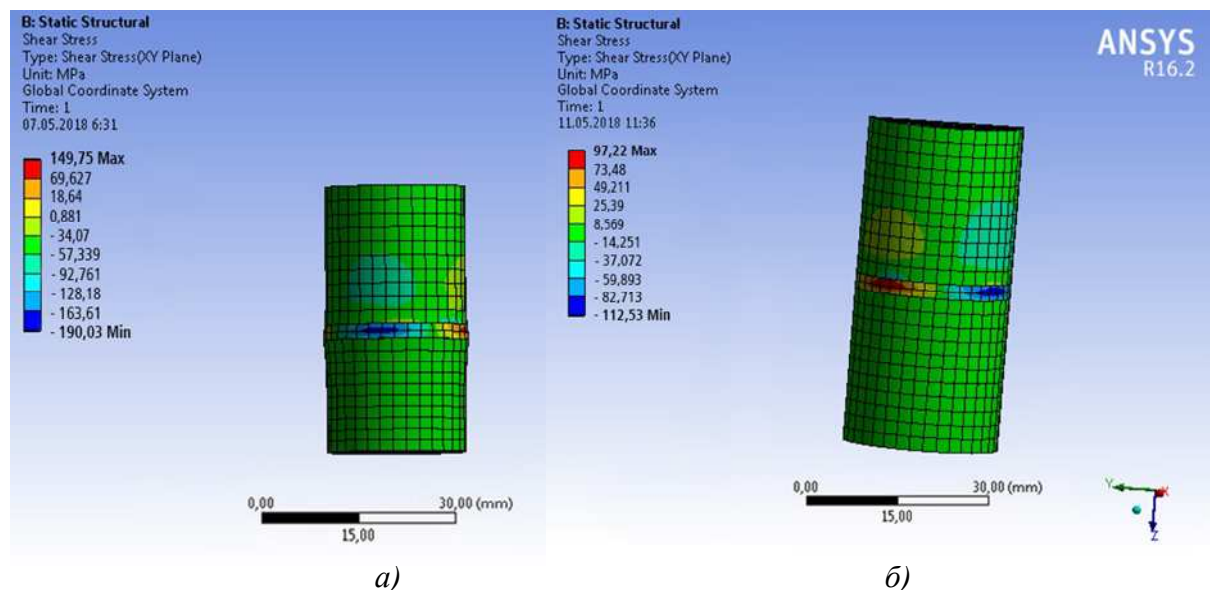


Рис. 12. Поля дотичних напружень, що виникають у теплофізично «масивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

Епюри дотичних напружень, наведені на рис. 13, показують, що їх максимум концентрується біля поверхні більш жорсткого матеріалу (кераміки) зі значеннями на рівні -190 МПа для НТР та -112 МПа для ТРПК. Треба зазначити, що рівень дотичних напружень суттєво нижче за еквівалентні й осьові та не виходять за межі допустимих як для НТР, так і ТРПК.

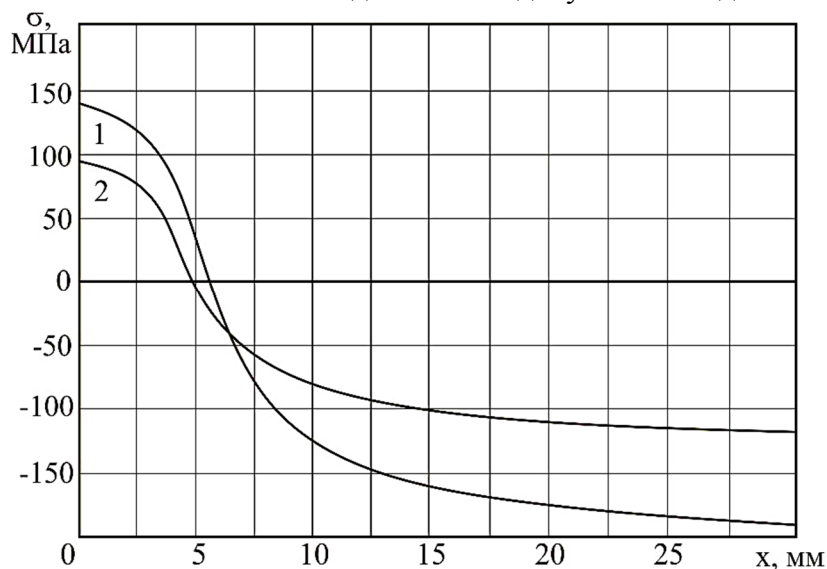


Рис. 13. Епюри дотичних напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «масивних» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

**Висновки відповідно до статті.** Таким чином, результати моделювання показують, що зварні з'єднання з неузгоджених матеріалів, виконані дифузійним зварюванням із використанням як джерела нагрівання розподіленої газорозрядної плазми тліючого розряду характеризуються складним об'ємним напружено-деформованим станом із помітною неоднорідністю розподілу полів напружень по перерізу вузла.

Шляхом моделювання в програмному пакеті ANSYS v.16.0, заснованому на методі скінчених елементів, встановлено, що під час дифузійного зварювання в НТР та ТРПК теплофізично «тонких» тіл із неузгодженими властивостями обидва джерела нагрівання забезпечують практично однаковий напружено-деформований стан із локалізацією на-

пружень у зоні зварного стику на рівні допустимих. Такий НДС є оптимальним з погляду деформаційної теорії утворення зварних з'єднань.

Встановлено, що при нагріванні теплофізично «масивних» різнорідних тіл у плазмі НТР утворюється несприятливий НДС із рівнем напружень, що на 19 % перевищує межу витривалості кераміки. Такий вузол функціонувати не може. Водночас у процесі зварювання в ТРПК рівень напружень, що виникають у «масивних» з'єднаннях, не перевищує допустимий.

### Список використаних джерел

1. Котельников Д. И. Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке. *Вестник Киев. политехн. ин-та. Сер. «Машиностроение»*. 1968. № 5. С. 56–60.
2. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке. *Технология и организация производства*. 1976. № 7. С. 57–59.
3. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016"*. April 2016. P.135–140.
4. Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (обзор). *Автоматическая сварка*. 2001. № 8. С. 41–44.
5. Болотов Г. П. Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде. *Информ. листок*. Чернигов: МТЦНТИ, 1992. № 2–92. 4 с.
6. Котельников Д. И., Крысанов Ю. Н. Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда. *Автоматическая сварка*. 1979. № 11. С. 27–29.
7. Болотов М. Г., Ганеєв Т. Р. Ефективність нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2012. № 1 (55). Ст. 126–131.
8. Болотов М. Г., Болотов Г. П. Порівняльна оцінка ефективності джерел енергії для дифузійного зварювання у вакуумі. *Вісник ЧДТУ*. 2010. № 42. С. 144–147.
9. Болотов М. Г. Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. 2013. № 1. С. 112–119.
10. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
11. Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узла втулка-втулка из разнородных материалов. *Зб. наук. праць НУК*. 2007. № 2. С. 50–56.
12. Квасницкий В. В., Матвиенко М. В., Лабарткава Ал. В., Пивоварова Т. А. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами применительно к деталям цилиндрической формы. *Зб. наук. праць НУК*. 2007. № 3. С. 61–67.
13. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узлов втулка-фланец. *Зб. наук. праць НУК*. 2008. № 2. С. 55–61.

### References

1. Kotelnikov, D. I. (1968). Nagrev tleyuschim razryadom pri diffuzionnoy svarke [The Heating by the Glow Discharge While Welding]. *Vestnik Kiev. politehn. in-ta. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin Kiev. Polytechnic Inst. Ser. «Engineering»*, 5, 56–60 [in Ukrainian].
2. Kotelnikov, D. I. (1976). Tehnologicheskie osobennosti primeneniya tleyushego razryada pri svarke [The Technological Features of Glow Discharge Application in Welding]. *Tehnologiya i organizatsiia proizvodstva – Technology and organization of production*, 7, 57–59 [in Ukrainian].
3. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. (April 2016). Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016"* (pp. 135–140) [in English].
4. Bolotov, G. P. (2001). Tleiuschii razriad kak istochnik nagreva v protsessah svarki i paiki (obzor) [The Glow Discharge as a heating source in the Processes of Welding and Brazing]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 8, 41–44 [in Russian].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. Bolotov, G. P. (1992). Ustanovka dlia diffuzionnoi svarki v tleiuschem razriade [The Installation for Diffusion Welding in the Glow Discharge]. *Inform. listok – Information sheet*. Chernigov: MTTsNTI, 2–92 [in Russian].
6. Kotelnikov, D. I., Krysanov, Yu. N. (1979). Raspredelenie plotnosti toka v katodnom pyatne tleyushego razryada [The Distribution of Current Density in the Cathode Spot of Glow Discharge]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 11, 27–29 [in Russian].
7. Bolotov, M. G., Ganieiev, T. R. (2012). EfektivnIst nagrivu pri zvaryuvanni v tIlyuchomu rozryadi z porozhnistim katodom. [The Heating Efficiency of Welding in the Hollow Cathode Glow Discharge]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 1 (55), 126–131 [in Ukrainian].
8. Bolotov, M. G., Bolotov, G. P. (2010). Porivnialna otsinka efektyvnosti dzherel energii dlia difuziynoho zvaryuvannya u vakuumi [The Comparative Estimation of the Energy Sources Efficiency for the Diffusion Welding in Vacuum]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 42, 144–147 [in Ukrainian].
9. Bolotov, M. G. (2013). Doslidzhennya lokalnih vlastivostey plazmi tIlyuchogo rozryadu z porozhnistim katodom stosovno do umov zvaryuvalnogo nagrIvu [The Investigation of Local Properties of Hollow Cathode Glow Discharge Plasma in the Welding Heating Conditions]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 1, 112–119 [in Ukrainian].
10. Rykalin, N. N. (1951). Raschet teplovyih protsessov pri svarke [The Calculation of the Thermal Processes in Welding]. Moscow: Mashgiz [in Russian].
11. Kvasnitskii, V. V., Ermolaev, G. V., Matvienko, M. V. (2007). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionnoy svarke uzla vtulka-vtulka iz raznorodnyih materialov [Stress-Strain State in Diffusion Welding of Sleeve-Sleeve knot from the Different Materials]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 50–56 [in Russian].
12. Kvasnitskii, V. V., Matvienko, M. V., Labartkava, Al. V., Pivovarova, T. A. (2007). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionn svarke metallov s razlichnyimi fizikomechanicheskimi svoystvami primenitelno k detalyam tsilindricheskoy formy [Stress-strain State in Diffusion Welding of Metals with Different Physicomechanical Properties with Reference to Cylindrical parts]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 3, 61–67 [in Russian].
13. Mahnenko, V. I., Kvasnitskii, V.V., Ermolaev, G. V., Matvienko, M. V. (2008). Vliyanie plasticheskikh deformatsiy na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionnoy svarke uzlov vtulka-flanets [The effect of plastic deformation on the stress-strain state in the diffusion welding of nodes sleeve-flange]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 55–61 [in Russian].

UDC 621.791.12

*Maksym Bolotov, Gennady Bolotov, Iryna Prybytko, Oleh Novomlynets*

## EVALUATION OF A STRESS AND STRAIN STATE OF DIFFUSION-WELDED JOINTS OF DIFFERENT MATERIALS RECEIVED IN HEATING IN GLOW DISCHARGE

**Urgency of the research.** Currently the high-current medium pressure glow discharge has been widely used in various technological processes of chemical-thermal treatment, coating, welding and soldering due to the possibility of regulating thermal influences in wide limits.

**Target setting.** However, along with favorable prerequisites, deficiencies were also found, mainly due to the complexity of welding in the field of normal glow discharge of details that differ significantly in thermophysical properties due to the peculiarities of thermal influence at high gas pressures in the working chamber.

**Actual scientific researches and issues analysis.** It is shown that the hollow cathode glow discharge provides an even distribution of thermal energy, which ensures the possibility of obtaining reliable metal-ceramic diffusion-welded joints.

**The research objective.** The purpose of this work is a comparative analysis of stress-strain state in the diffusion welding of compounds from heterogeneous materials, which occurs when heated in a normal glow discharge and glow discharge, initiated in a hollow cathode.

**The statement of basic materials.** Computer simulation in the ANSYS v.16.0 software package provides a comparative analysis of the stress-strain state of diffusion-welded thermally physically "thin" and "massive" parts when heated in a field of normal glow discharge and discharge in a hollow cathode.

**Conclusions.** It was established that when heat-physically "massive" heterogeneous bodies are heated in the plasma, unfavorable stress-strain state with stress levels is formed that is 19% higher than the limit of ceramics endurance. Such a node cannot function. At the same time, when welding in Hollow Cathode Glow Discharge the level of stresses occurring in "massive" compounds does not exceed the permissible.

**Keywords:** glow discharge; stress-strain state; gas-discharge plasma; diffusion welding.

**Fig.:** 13. **References:** 13.

**Болотов Максим Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Maksym** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** piligrim.83@mail.ru

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

**Scopus:** 57190377278

**ResearcherID:** H-4183-2014

**Болотов Геннадій Павлович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Gennady** – Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** bolotovgp@mail.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

**ResearcherID:** H-5304-2014

**Scopus:** 6506157907

**Прибытко Ірина Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Prybytko Iryna** - PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** prybytko\_ira@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>

**ResearcherID:** F-7325-2014

**Новомлинець Олег Олександрович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна).

**Novomlynets Oleh** – Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** oonl@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

**ResearcherID:** F-8166-2014

**Scopus Author ID:** 56938958300; 6507741249