

**М. Матвієнко**

Аспірант,  
Національний університет  
кораблебудування,  
м. Миколаїв

**В. Квасницький**

Доцент, канд. техн. наук,  
Національний технічний  
університет України «КПІ»,  
м. Київ

УДК 621.791

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДИFUЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ КОРПУСІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

*Г а і з'ясування етіології і патогенезу ішемічної-або діабетичної панаїтиї  
атеросклерозу і діабетичної скарлатини і гіпертензивної артерії та доцільності  
скарлатини і гіпертензивної артерії та доцільності 10864 та 12Х18Н10Т.*

корпус електромагніта, дифузійне зварювання, напружено-деформований стан

Зварні корпуси електромагнітів мають конструктивні особливості, які істотно утрудняють їх зварювання — потрібно зварювати п'ять деталей за один прийом і локалізувати високотемпературну деформацію металу в зоні стиків. Аналіз існуючих технологій виготовлення таких корпусів показав, що дифузійне зварювання сталей типу 10864 або армо-заліза і 12Х18Н10Т, з яких їх виготовляють, є перспективним.

Дифузійному зварюванню магнітних і немагнітних матеріалів присвячена низка праць, серед яких одними з перших були праці [1, 2]. Автори дослідили зварювання армо-заліза і сталі 12Х18Н10Т. Результати досліджень магнітних і немагнітних матеріалів узагальнені пізніше в працях [3 — 6].

Дифузійне зварювання корпусів електромагнітів детально розглядалося також у праці [7]. У зв'язку з геометрією деталей та різними умовами індукційного нагріву зварювання деталей виконували у вакуумі за два прийоми: частину стиків зварювали при температурі 1050 °С,  $t=20$  хв,  $p=5,39$  МПа, а решту стиків — під тиском 7,84 МПа за другий цикл зварювання, що збільшує енергоємність та трудомісткість процесу вдвічі. Крім

цього, це може призвести до підвищеної деформації та виникнення великих залишкових напружень у зоні попередньо зварених стиків.

Порівняння режимів зварювання деталей, наведених у працях [5, 7], показує їхню істотну відмінність, хоч магнітні сталі були практично однакові. Ще більші розбіжності в технологіях дифузійного з'єднання магнітних і немагнітних матеріалів є в інших працях [2 — 4, 6]. Наприклад, у [6] описано дифузійне зварювання магнітних матеріалів через проміжну прокладку з ультрадисперсних порошків форміату нікелю, що має певні незручності при складанні вузла.

Аналіз існуючих технологій виготовлення корпусів електромагнітів показує перспективність дифузійного зварювання магнітних та немагнітних сталей, але корпуси електромагнітів мають особливості, пов'язані з геометрією деталей та необхідністю їх зварювання за один прийом, що вимагає оптимізації форми і розмірів заготовок під зварювання.

Крім цього, при зварюванні корпусу за один прийом проводиться загальний нагрів усієї деталі, що обумовлює потребу знайти ефективний спосіб локалізації пластичної

деформації металу в зоні стику та оптимізувати параметри режиму зварювання.

Метою статті є вдосконалення технології дифузійного зварювання аустенітних та електротехнічних сталей корпусів електромагнітів на основі результатів дослідження напружено-деформованого стану з'єднання.

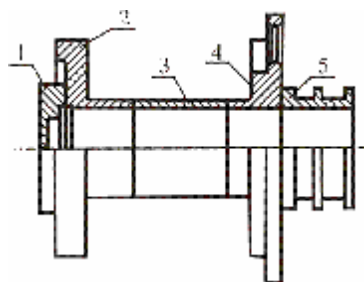
**Постановка задачі.** Силовим елементом електропневмоклапана гідросистем високого тиску є корпус електромагніту, який складається з п'яти деталей і має чотири стики (рис. 1). Елементи корпусу виготовляють з немагнітної сталі 12Х18Н10Т і магнітної (10895, 10864). Для забезпечення надійної роботи клапанів потрібно створити замкнутий і рівномірний магнітний контур між деталями, а тому допуски на зміну розмірів з'єднуваних елементів дуже жорсткі. У зв'язку з цим, використання методів зварювання плавленням ускладнено, а паяння виробу не забезпечує потрібну міцність та герметичність. Оптимальним способом виготовлення такої конструкції є дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ).

**Результати досліджень.** Особливістю з'єднуваних матеріалів є різний опір деформації. Тому, для визначення ефективного способу локалізації пластичної деформації металу в зоні стику та вибору параметрів режиму досліджували характер напружено-деформованого стану (НДС) при зварюванні шляхом комп'ютерного моделювання.

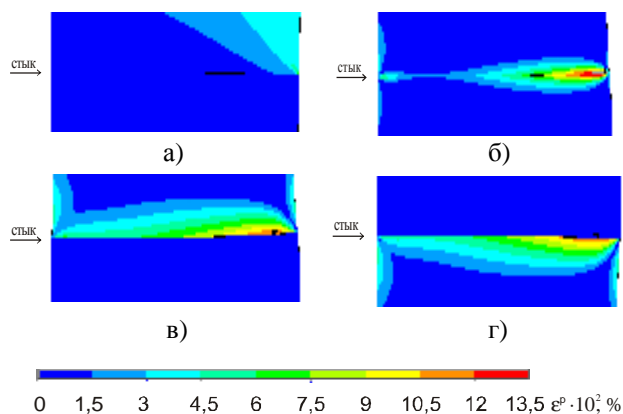
Дослідження виконувались як з урахуванням пружних деформацій [8], так і деформацій миттєвої пластичності [9] та деформацій повзучості [10].

Дослідження НДС при навантаженні тиском у пружній стадії показали, що визначальним чинником утворення НДС у зоні стику є відмінність жорсткостей (модулів пружності  $E$ ) матеріалів. При цьому, крім осьових напружень стиску, з'являються незначні радіальні та осьові напруження, дещо змінюються еквівалентні напруження. З'являються також дотичні напруження, які зростають від нуля в середній частині стику до максимуму на периферії. Розподіл напружень по стику близький до рівномірного.

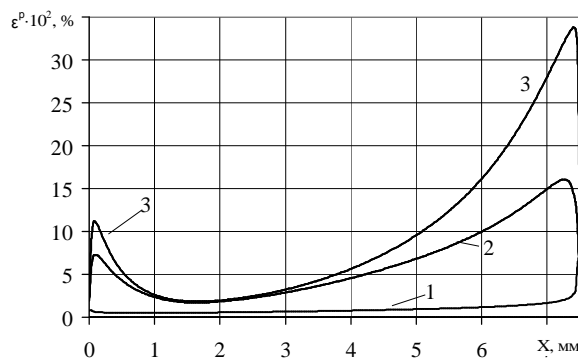
Поява деформацій миттєвої (короткочасної) пластичності в одному з матеріалів ускладнює НДС. Головним чинником при цьому є відмінність меж плинності матеріалів. У матеріалі з меншою межею плинності в момент появи пластичних деформацій у зоні стику еквівалентні напруження зменшуються. При подальшому навантаженні пластично деформується частина деталі, яка віддалена від стику (рис. 2,а). Виявляється відомий ефект зміцнення «м'якого» матеріалу в зоні контакту з міцнішим. Осьові напруження в стику також розподіляються



**Рис. 1.** Корпус електромагніту: 1, 3, 5 — деталі зі сталі 12Х18Н10Т; 2, 4 — деталі з магнітної сталі



**Рис. 2.** Поля пластичних деформацій при навантаженні тиском (а), нагрівом-охолоджуванням (б), тиском з нагрівом (в) і тиском з охолоджуванням (г)



**Рис. 3.** Епюри пластичних деформацій вздовж стику при навантаженні тиском (1), змінію температури (2) та спільно тиском і термоциклуванням (3)

нерівномірно. Відповідно, і пластичні деформації вздовж стику розподілені нерівномірно, змінюючись на порядок (рис. 3). Отже, в середній (внутрішній) частині стику слід чекати зниження якості з'єднання поверхонь порівняно з периферійними ділянками. Закономірності, які встановлено для деформацій миттєвої пластичності, в основному зберігаються і при деформаціях повзучості.

Ці результати показують, що класичний варіант навантаження тиском не є оптимальним, оскільки не забезпечує рівномірного розподілу пластичних деформацій по стику та призводить до підвищених загальних деформацій зварюваного вузла.

Дослідження НДС при навантаженні зміною температури (термоциклуванням) після схоплювання поверхонь показало, що визначальним чинником утворення складного НДС у зоні стику є відмінність КЛТР матеріалів. У районі стику створюється складний НДС. При цьому його характер практично залишається однаковим як в області пружної деформації, так і при появі пластичних деформацій. Відмінність помітна тільки в дуже вузькій зоні (біля 1 мм) поблизу стику. Як видно з рисунків полів пластичних деформацій (рис. 2,б), при нагріванні або охолодженні матеріалів з різними КЛТР забезпечується ідеальна локалізація пластичних деформацій саме в зоні стику із захопленням обох матеріалів.

Пластичні деформації рівномірно розподілені між матеріалами в безпосередній близькості від стику. У середній частині стику вони невеликі, поступово збільшуються з наближенням до зовнішньої поверхні зразка (див. рис. 3). У стику є точка з мінімальними пластичними деформаціями, яка розташовується на віддалі 0,23 товщини втулки від її внутрішньої поверхні, що відповідає точці з нульовими дотичними та мінімальними еквівалентними напруженнями в пружному розв'язку. З віддаленням від стику величина пластичних деформацій різко зменшується.

Деформації повзучості одного з матеріалів помітно знижують рівень еквівалентних напружень в обох матеріалах. Відповідно змінюються і поля пластичних деформацій. Вони поступово розширюються та охоплюють все більшу область поблизу стику.

Таким чином, термоциклування при з'єднанні матеріалів з різними КЛТР створює ідеальні умови для локалізації пластичних деформацій саме в зоні стику. При цьому пластичні деформації розвиваються переважно у напрямі осі зразка, тобто перпендикулярно стику, що повинно сприяти утворенню фізичного контакту матеріалів у стику і підвищенню якості з'єднання.

Дослідження НДС при спільному навантаженні тиском і нагрівом-охолодженням матеріалів показало, що поля еквівалентних напружень стають ще складнішими з явно вираженою асиметрією. Поява пластичних деформацій змінює характер поля напружень тільки у вузькій зоні в безпосередній близькості від стику. При зміні нагріву охолодженням поля в матеріалах міняються місцями як за відсутності пластичних деформацій, так і при пластичній деформації обох матеріалів. Відповідно, поява пластичних деформацій спостерігається по черзі в матеріалі з меншим КЛТР при нагріванні та з більшим КЛТР — при охолодженні. Це призводить до зменшення і вирівнювання еквівалентних напружень уздовж стику в матеріалі, що пластично деформується. Уздовж осі зразка розподіл еквівалентних напружень зберігає близький до ідеального, з погляду локалізації пластичних деформацій, характер, але пік у зоні стику по черзі знаходиться в одному або другому матеріалі при зміні нагрівання охолодженням.

Пластичні деформації нерівномірно розподілені як вздовж стику, так і між матеріалами з різними КЛТР (див. рис. 2, в, г). У матеріалі з меншим КЛТР при нагріванні (з більшим КЛТР при охолодженні) у міру наближення до зовнішньої поверхні зразка вони поступово збільшуються (див. рис. 3). У матеріалі з більшим КЛТР при нагріванні (з меншим КЛТР при охолодженні) вони практично відсутні. Загальний рівень пластичних деформацій при спільному навантаженні тиском і зміною температури в середній частині стику вищий, а на периферії нижчий, ніж при зміні температури без тиску, тобто по стику вони розподілені рівномірніше. В міру віддалення від стику величина пластичних деформацій швидко зменшується.

Деформації повзучості також зосереджені поблизу стику, з часом вони охоплюють все ширшу зону, мало змінюючись за величиною. При тривалій витримці деформації повзучості розповсюджуються на всю висоту зразка. При спільному навантаженні тиском і охолод-

жуванням характер зміни поля деформацій повзучості аналогічний варіанту тиску з нагрівом.

При спільному навантаженні тиском і зміною температури спостерігається найрівномірніший розподіл пластичних деформацій вздовж стику, пластичні деформації по черзі локалізуються в зоні стику то в одному, то в іншому матеріалі.

Порівняння отриманих методом голографічної інтерферометрії експериментальних даних з розрахунковими показало добру збіжність, що підтверджує адекватність моделювання і можливість його використання для розв'язування практичних завдань [11].

Відпрацювання режимів дифузійного зварювання проводилось у вакуумі на установці УДСВ-ДТ на циліндричних або трубчастих зразках, виготовлених з магнітних (10864, 10895, 10880) і немагнітних сталей (12Х18Н10Т). Завдяки проведеному моделюванню встановлено, що найефективнішим способом локалізації пластичних деформацій саме в зоні стику в усіх типах вузлів є термоциклування в умовах стиснення. Виходячи з різниці КЛТР і впливу температури на кристалічну ґратку заліза вибрано інтервал термоциклування 600 — 1000 °С.

Для експериментального дослідження впливу термоциклування на якість зварних з'єднань зварювалися зразки при сталому тиску 10 МПа з термоциклуванням при витримці 1 хв при 1000 °С, а також зварювалися зразки без термоциклування при сталому тиску 15 МПа і витримці при 1000 °С впродовж часу, який був при зварюванні зразків з термоциклуванням від початку і до кінця зварювання, включаючи час нагрівання від 600 до 1000 °С і час охолодження від 1000 до 600 °С.

Випробування зразків на статичний розтяг після механічного оброблення показали, що зразки без термоциклування руйнувалися при напруженні до 255 МПа або при механічному обробленні. При зварюванні з термоциклуванням достатньо трьох термоциклів для забезпечення рівномірності з'єднань з магнітною сталлю 360 — 395 МПа, руйнування відбувалося по магнітній сталі).

Випробування циліндричних зразків на ударний згин без механічного оброблення після зварювання на маятниковому копрі КМ30 показали, що кут загину 90° зразків

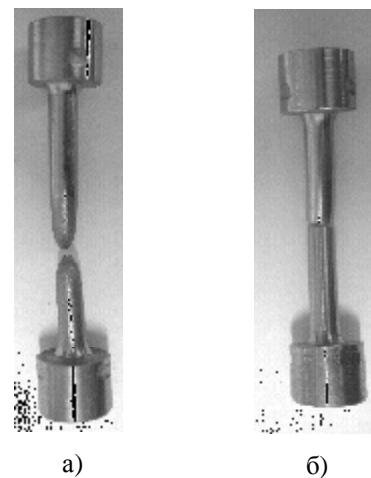


Рис. 4. Загальний вигляд після випробувань зразків, зварених без термоциклування (а) і з термоциклуванням (б)



Рис. 5. Зразок після випробування на ударний згин



Рис. 6. Зварний зразок, що імітує реальний виріб

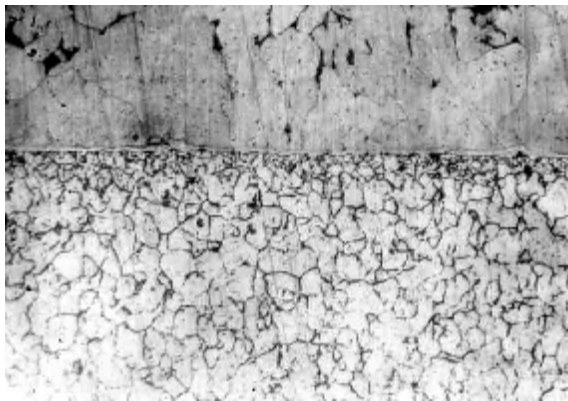


Рис. 7. Мікроструктури зварних з'єднань зразків, що імітують вироби, зварені на різних режимах з термоцикуванням (зменшено в 2 рази);  $\times 250$

діаметром 15 мм не спричиняв руйнування (рис. 5), а енергія удару перевищувала 300 Дж.

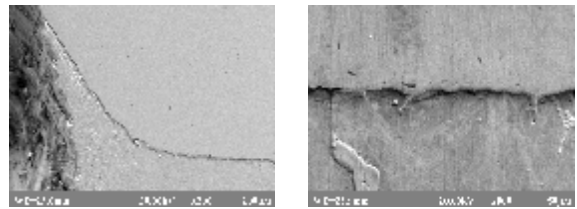
Зварювання сталей досліджували також на зразках, що імітують реальний виріб (рис. 6).

Зварні зразки піддавали мікроструктурним дослідженням та механічним випробуванням. Структуру з'єднань показано на рис. 7. Аналіз мікроструктур показав, що в зоні з'єднання видно дрібне зерно, що свідчить про локалізацію пластичної деформації. Непровари й інші дефекти в зварному з'єднанні відсутні.

Зразки, що імітують виріб, зварювали на різних режимах, міняючи кількість термоциклів від двох до десяти. При випробуванні всі зразки руйнувалися по магнітній сталі при напруженнях (363 – 398)/383 МПа (у знаменнику середнє значення).

У процесі випробувань зварні стики не руйнувалися, що давало змогу на них проводити мікроструктурне дослідження металу в зоні зварювання, а також локальний рентгеноспектральний мікроаналіз.

Мікроструктура металу зруйнованих зразків у зоні зварювання показана на рис. 8, а — біля зовнішньої поверхні, а на рис. 8, б — в центрі з'єднання. На периферії чітко видно деформацію магнітної сталі при зсуві й високоякісне з'єднання сталей. Чіткий рельєф на поверхні



а)

б)

Рис. 8. Мікроструктура металу в зоні зварювання зразка, який імітує виріб, після випробувань: а – біля зовнішньої поверхні,  $\times 200$ ; б – в центрі,  $\times 800$ . (зменшено в 4 рази)

магнітної сталі свідчить про глибоку пластичну деформацію.

Зварювання зразків, що імітують вироби, підтвердило результати попередніх теоретичних і експериментальних досліджень і дала підстави перейти до експериментального зварювання деталей. Зварювання виконувалося з обов'язковим контролем температури на всіх чотирьох стиках.

Після зварювання чотири деталі розрізали по діаметральній площині вздовж осі для виготовлення мікрошліфів і дослідження макро- і мікроструктури на оптичному мікроскопі НЕОФОТ-21 і растровому електронному мікроскопі РЕММА 102-02, а також для локального рентгеноспектрального мікроаналізу на РЕММА 102-02.

Структура з'єднань аналогічна структурі металу, яка спостерігається при зварюванні зразків. Біля крамок стику й по довжині всього стику є шар металу з дуже дрібним зерном через локалізацію пластичної деформації у стику (рис. 9).

Порівняння результатів зварювання експериментальних виробів та зварювання циліндричних зразків і зразків, що імітують виріб, показало їхню ідентичність, що підтверджує вибраний раніше режим зварювання з термоцикуванням.

На вибраному режимі були зварені експериментальні вироби для випробувань гідравлічним тиском.

Корпуси електромагнітів перевіряли на герметичність мастилом АМГ-10 при тиску (50 $\pm$ 10) ат. Корпуси були випробувані на цей тиск і вся партія витримала випробування. Випробування одного з корпусів були продовжені до руйнування і показали, що руйнування відбулося при тиску 98 МПа (980 ат.). Загальний вид електромагнітного клапана до і після руйнування показано на рис. 10.

З рис. 10 видно, що руйнування відбулося при великій пластичній деформації (25 %) по діаметру. Поверхня руйнування має вириви з основного металу. До початку руйнування корпус був герметичний у всьому діапазоні тиску (0 — 980 ат.).

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано удосконалений спосіб дифузійного зварювання різномірних матеріалів, на який отримано патент [12].

**Висновки.** 1. Для зварювання всіх стиків одночасно розроблена конструкція зварних з'єднань з однаковою тиском стиснення за рахунок збільшення товщини тонкостінних елементів.

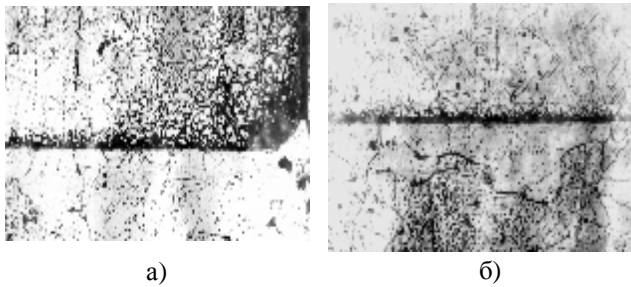


Рис. 9. Мікроструктура металу в зоні з'єднання сталей біля кромки стику (а) і в середині ширини стику (б);  $\times 160$  (зменшено в 4 рази)

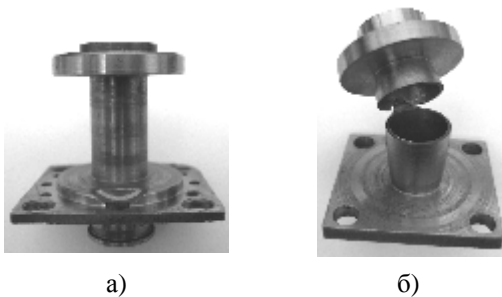


Рис. 10. Зварний корпус до (а) і після (б) гідравлічних випробувань

2. Для локалізації пластичної деформації металу в зоні стику і вирівнювання еквівалентного напруження по площині стику запропоновано термоцикування.

3. Вибір режимів зварювання електромагнітних клапанів проводили за результатами їх впливу на структуру, механічні властивості зварних з'єднань стандартних зразків, зразків, що імітують виріб, і реальних виробів.

4. Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність теоретичних розробок, зокрема, доцільність використання термоцикування при зварюванні.

### Література

1. Котельников Д.И. Исследование соединения стали 12Х18Н9Т с армо-железом, полученного диффузионной сваркой // Автоматическая сварка. — 1970. — №4. — С. 25—27.
2. Новиков В.Г. Разработка технологии диффузионной сварки в вакууме корпусов электромагнитов // В кн. Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов: Сб. статей. — М.: ПНИЛ ДСВ, 1973. — №5. — С. 102—106.

3. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. Н.В. Казакова. — М.: Машиностроение, 1981. — 271 с.

4. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.

5. Котельников Д.И. Сварка давлением в тлеющем разряде. — М.: Металлургия, 1981. — 116 с.

6. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов. — М.: Академия, 2006. — 208 с.

7. Капралов Б.П., Сигаев А.П., Козловский В.И. Технологический процесс диффузионной сварки в вакууме корпусов электропневмоклапанов // Сварочное производство. — 1985. — №10. — С. 49—50.

8. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Моделирование напряжено-деформованного stanu при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами // Машинознавство. — 2007. — №7(121). — С. 30—33.

9. Махненко В.И., Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В. Напряженно-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами // Автомат. сварка. — 2008. — №8. — С. 5—10.

10. Влияние деформаций ползучести на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных материалов / Квасницкий В.В., Лабарткава А.В., Матвиенко М.В., Волкодаева Е.Н., Гетманцев А.В. / Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — №6 (423). — С. 41—49.

11. Золотой Ю.Г. Экспериментальное исследование деформации сварного узла типа втулка — втулка из разнородных материалов / Ю.Г. Золотой, В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко, А.С. Карпенюк // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв: НУК. — 2008. — №4. — С. 43—48.

12. Патент на винахід № 81583. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Г.В. Ермолаев та інші. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. ИА. МПК (2006). В23К 20/14. Заявл. 21.11.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. 1.

Отримана 20.05.09

V. Kvasnycky, M. Matvienko

### Improvement of diffusion welding technology of electromagnets corpus on the basis of stress-strain state

National Technical University of Ukraine «KPI», Kyiv;  
National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Improved technology of electromagnetic valves corps welding has been proposed on the basis of computer modeling of stressedly-deformed state and conducted researches of diffusion welding of steels by type 10864 and 12X18H10T regime parameters influence.