

УДК 621.791
К 32

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КЛАПАНОВ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В. В. Квасницкий, д-р техн. наук, проф.¹;
М. В. Матвиенко, магистр²;
Г. В. Ермолаев, канд. техн. наук, доц.²

¹Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев;

²Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Выполнен анализ результатов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке узла электромагнитного клапана по существующей и усовершенствованной технологиям. Показано, что предлагаемая технология позволяет сократить затраты на 30 % при сохранении необходимого качества соединения.

Ключевые слова: диффузионная сварка, напряженно-деформированное состояние, разнородные материалы, компьютерное моделирование.

Анотація. Виконано аналіз результатів комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні вузла електромагнітного клапана за існуючою та вдосконаленою технологіями. Показано, що запропонована технологія дозволяє скоротити витрати на 30 % при збереженні необхідної якості з'єднання.

Ключові слова: дифузійне зварювання, напружено-деформований стан, різномірні матеріали, комп'ютерне моделювання.

Abstract. The analysis of the results of computer simulation of the stress-strain state at diffusion welding of a solenoid valve joint according to the existing and improved technologies. It is considered that the proposed technology allows to reduce the expenses by 30% while maintaining the necessary quality of the joint.

Keywords: diffusion welding, stress-strain state, heterogeneous materials, computer simulation.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При изготовлении корпусов электромагнитных клапанов различного назначения широко используются магнитные и немагнитные стали, в частности 10864 и 12Х18Н10Т. В корпусе клапана пять чередующихся друг с другом деталей из этих сталей соединяются таким образом, чтобы создать равномерный замкнутый магнитный контур. Сварка плавлением стыков указанных сталей проблематична из-за образования широких зон перемешивания магнитной и немагнитной сталей. Поэтому наиболее целесообразным способом соединения деталей, причем одновременно по всем стыкам, является диффузионная сварка (ДС) [3].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

При диффузионной сварке выделяют три стадии образования соединения [2, 4, 13]: сближение соединяемых поверхностей на межатомные расстояния и образование между ними физического контакта; активация контактируемых поверхностей, т. е. образование у поверхностных атомов свободных связей; объемное взаимодействие соединяемых материалов.

При сварке близких по механическим свойствам материалов формирование соединения включает в себя стадии образования контакта активации поверхностей и объемного взаимодействия. Формирование

физического контакта при диффузионной сварке происходит вследствие микропластической деформации контактирующих поверхностей, в которую вовлекаются зависящие от способа и схемы нагрева определенные приконтактные объемы, а также макрообъемы детали или вся деталь. Для интенсификации процесса пластической деформации и образования сварного соединения используют ультразвуковые колебания, приложение ударного сварочного давления, принудительное деформирование, при котором давление сжатия превышает предел текучести и циклически изменяется [1, 2, 4]. Одним из новых перспективных методов локализации и интенсификации пластических деформаций в зоне соединения является способ ДС с термоциклированием для материалов с отличающимися термическими коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) [7, 11, 12]. При использовании данной технологии установлено формирование сложного напряженно-деформированного (НД) состояния в зоне стыка, благоприятного для сварки. Однако применяемый в настоящее время процесс ДС корпуса электромагнитного клапана — длительный [12], поэтому поиск путей повышения производительности диффузионной сварки в вакууме без снижения качества соединения является *актуальным*.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — повышение производительности диффузионной сварки в вакууме корпусов

электромагнитных клапанов путем управления термомодеформационными процессами.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

По существующей технологии ДС детали нагревают до температуры 1000°C , нагружают усилием сжатия и трижды повторяют цикл снижения и повышения температуры. После третьего цикла температуру повышают до 1050°C , производят выдержку в течение 12 мин и снижают температуру. Условно можно выделить этап термоциклирования, на котором преимущественно происходят сближение соединяемых поверхностей, образование между ними физического контакта и активация контактируемых поверхностей, и этап объемного взаимодействия соединяемых материалов.

Для поиска путей сокращения длительности сварки и оценки влияния режимов на термомодеформационные процессы, происходящие при формировании соединения, была проведена ДС корпуса электромагнитного клапана с замером укорочения заготовки в процессе сварки (рис. 1). Анализ результатов замеров показал, что развитие пластических деформаций происходит главным образом при нагреве детали, что объясняется благоприятным сочетанием силовых, обусловленных приложенным давлением сжатия, температурных, обусловленных разностью ТКЛР соединяемых материалов, и структурных деформаций, происходящих в стали 10864 [6]. При снижении температуры пластические деформации незначительны. Также следует отметить, что в существующем технологическом процессе сварки в создании соединения не задействован участок нагрева от комнатной температуры до температуры сварки. Вместе с тем в работе [8] показано, что приложение давления уже на этом участке позволяет использовать его в общем цикле сварки. Исходя из этого, можно утверждать, что эффективно, с точки зрения создания НД состояния в зоне соединения, используется не более 40% времени на этапе термоциклирования — 22 мин из 60. Также можно предположить, что выдержку при постоянной температуре можно сократить, так как тер-

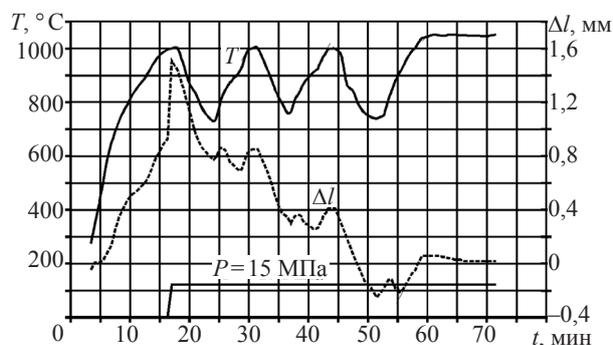


Рис. 1. Изменение температуры T , давления P и укорочение Δl в процессе сварки корпуса электромагнитного клапана

моциклирование в процессе сварки интенсифицирует рекристаллизацию, образование в зоне стыка внутрикристаллитных межатомных связей и диффузию, т. е. процессы объемного взаимодействия, обеспечивающие получение сварного соединения [10].

Исходя из перечисленного предложено для увеличения производительности ДС нагружать усилием сжатия 15 МПа сварной узел еще при комнатной температуре — с целью использовать участок нагрева до температуры сварки для создания напряженно-деформированного состояния в зоне соединения. Также предложено этот участок разбить на два. На первом участке, от комнатной температуры до температуры 750°C , когда в узле начинают появляться пластические деформации, предложено производить нагрев со скоростью не более 100...120 град/мин. Как показали расчеты [9], эта скорость обеспечивает разность температур по толщине узла в пределах 10...15 град.

На втором участке (температура $750...1000^{\circ}\text{C}$) скорость нагрева необходимо уменьшить до 30 град/мин с целью более равномерного нагрева по толщине соединяемых материалов (разница температур при этом не превышает 5 град) и создания благоприятных условий для равномерного пластического деформирования по всей поверхности стыка. Для окончательного выравнивания температуры в узле его рекомендовано выдержать при температуре 1000°C в течение 2 мин. После этого снижают температуру до 750°C со скоростью не более 30 град/мин. При достижении данной температуры узел снова нагревают до температуры 1000°C с той же скоростью и выдерживают при этой температуре в течение 2 мин. На этом стадию термоциклирования можно завершить, так как суммарное время нагрева свариваемого узла уже превышает время суммарного нагрева при существующей технологии сварки.

Вторую стадию процесса ДС (выдержка при температуре 1050°C и последующее охлаждение) предложено оставить в целом без изменения, за исключением сокращения времени выдержки при постоянной температуре до 6 мин.

Исследования влияния предложенных изменений на процесс формирования соединения выполняли методом компьютерного моделирования на узлах типа втулка–втулка, являющихся частью узла сварной заготовки корпуса электромагнитного клапана. Физическая и конечно-элементная модели показаны на рис. 2. Узел изготовлен из аустенитной стали 12X18H10T (деталь 1) и стали 10895 (деталь 2). При моделировании ДС расчеты проводились с учетом различия dilatометрических кривых соединяемых материалов, а также зависимостей модулей упругости, пределов текучести и параметров ползучести соединяемых материалов от температуры [5]. Конечно-элементный анализ выполнялся в двумерной постановке с учетом

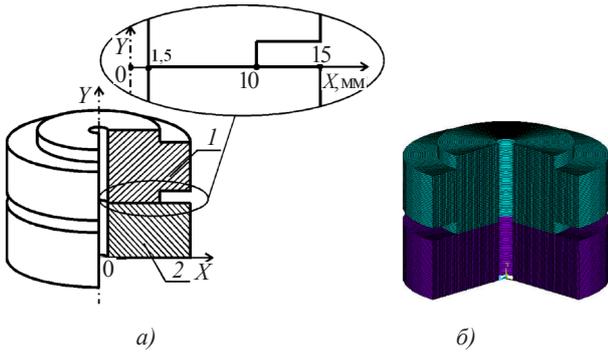


Рис. 2. Общий вид (а) и конечно-элементная модель (б) сварного узла из сталей 12Х18Н10Т (1) и 10895 (2)

осесимметричности конструкции — тип элемента PLANE 182.

Исследовались две модели ДС: по существующей [7, 11, 12] и предлагаемой технологиям. Сравнение проводили по НДС состоянию, образовавшемуся после завершения стадии термоциклирования (рис. 3, т. А), так как к моменту выдержки при постоянной температуре процесс формирования физического контакта и активации контактируемых поверхностей можно считать завершенным.

Анализировались поля пластических деформаций — как мгновенной пластичности, так и ползучести (рис. 4). Сравнивались распределения радиальных, осевых и сдвиговых пластических деформаций (мгновенной и ползучести) в зоне стыка при сварке по существующей и предлагаемой технологиям.

При сравнении полей (рис. 4, а) и эпюр (рис. 5) распределения радиальных деформаций мгновенной пластичности видно, что при использовании предлагаемой технологии в стали 10895 повышаются степень локализации, уровень и равномерность распределения деформаций в зоне стыка, что приводит к лучшему формированию физического контакта по всей площади соединения.

В стали 12Х18Н10Т мгновенные радиальные пластические деформации практически отсутствуют, за исключением небольших всплесков у внутренней и внешней поверхностей втулки. Радиальные деформации ползучести (рис. 4, з и б) в зоне стыка по характеру одинаковы, но уровень при использовании предлагаемой технологии в стали 10895 более чем в два раза выше, чем при существующей.

Характер полей осевых деформаций мгновенной пластичности (см. рис. 4, б), возникающих при сварке по существующей и предлагаемой технологиям, качественно не отличается. Однако во втором случае происходит значительное увеличение уровня деформаций в зоне стыка в стали 10895 (рис. 7). В стали 12Х18Н10Т данный вид деформаций практически отсутствует. Характер распределения осевых деформаций ползучести также практически не меняется (см. рис. 4, д). Однако при использовании

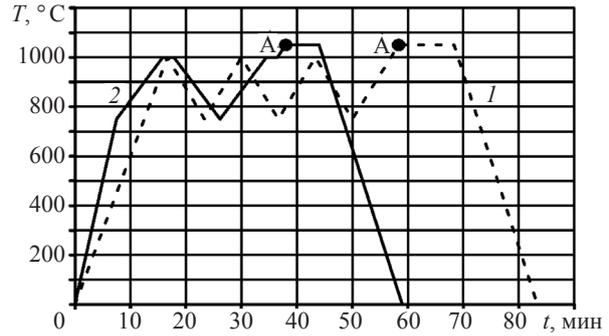


Рис. 3. Циклограмма процесса сварки по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

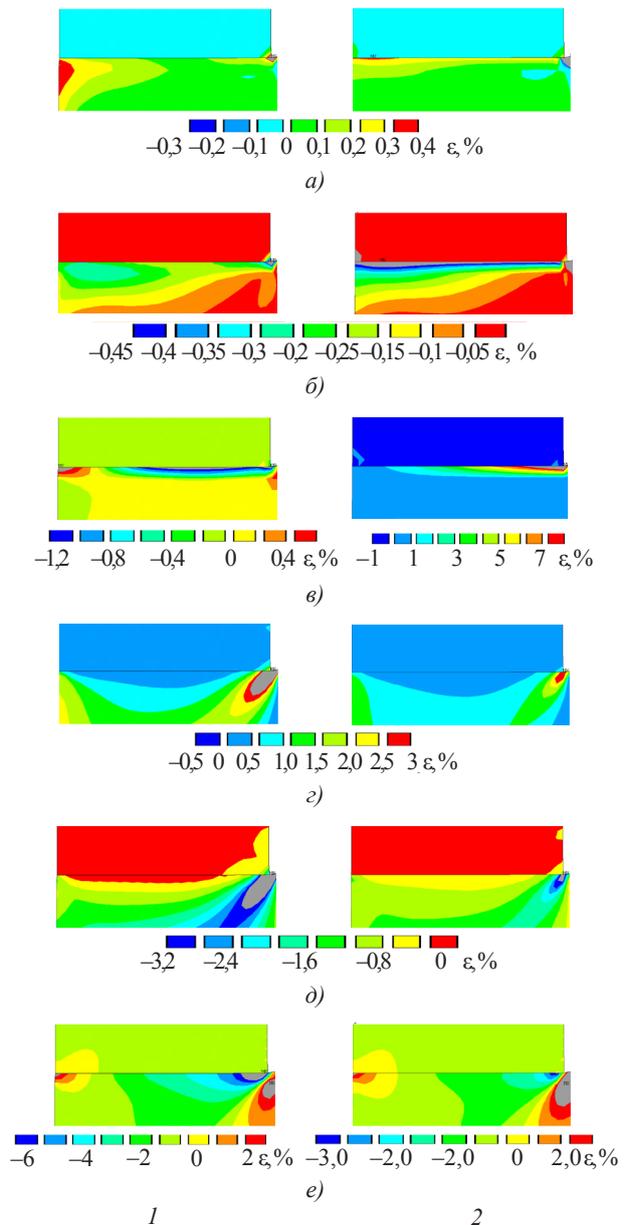


Рис. 4. Поля радиальных (а), осевых (б), сдвиговых (в) мгновенных пластических деформаций и радиальных (з), осевых (д), сдвиговых (е) деформаций ползучести по окончании этапа термоциклирования по существующей (1) и по предлагаемой (2) технологиям

предлагаемых режимов увеличиваются деформации в зоне стыка со стороны магнитного материала, в нержавеющей стали деформационная картина незначительно изменяется в сторону более равномерного распределения (рис. 8).

Характер распределения сдвиговых мгновенных пластических деформаций (см. рис. 4, в) существенно

отличается только со стороны стали 10895. При использовании предлагаемой технологии значительно возрастает уровень пластических деформаций, особенно у внешней стороны стыка (рис. 9).

В немагнитной стали деформации практически отсутствуют в обоих случаях. Картина распределения сдвиговых деформаций ползучести (см. рис. 4, е)

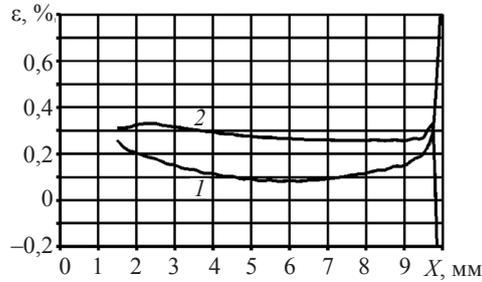


Рис. 5. Распределение радиальных пластических деформаций вдоль стыка в стали 10895 по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

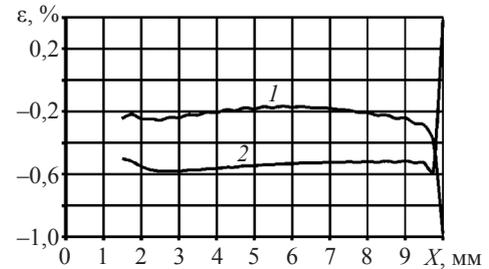
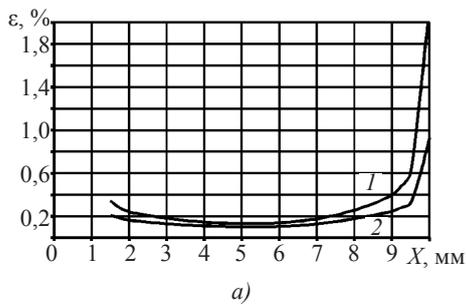
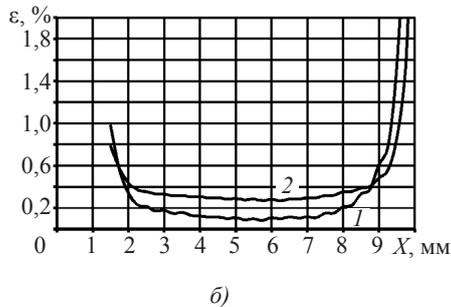


Рис. 7. Распределение осевых пластических деформаций вдоль стыка в стали 10895 по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

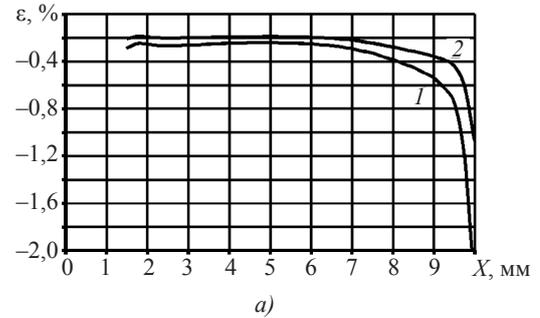


а)

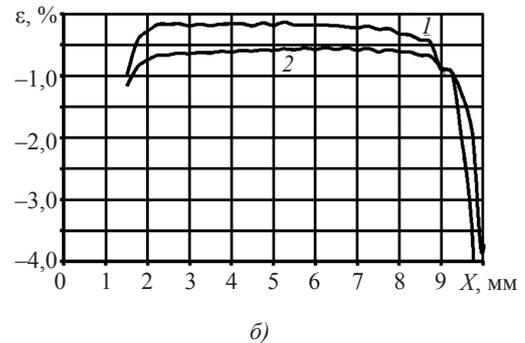


б)

Рис. 6. Распределение радиальных деформаций ползучести вдоль стыка в сталях 12X18H10T (а) и 10895 (б) по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям



а)



б)

Рис. 8. Распределение осевых деформаций ползучести вдоль стыка в сталях 12X18H10T (а) и 10895 (б) по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

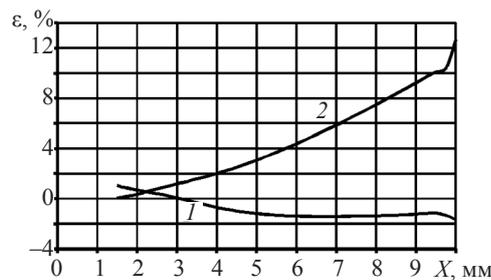


Рис. 9. Распределение сдвиговых пластических деформаций вдоль стыка в стали 10895 по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

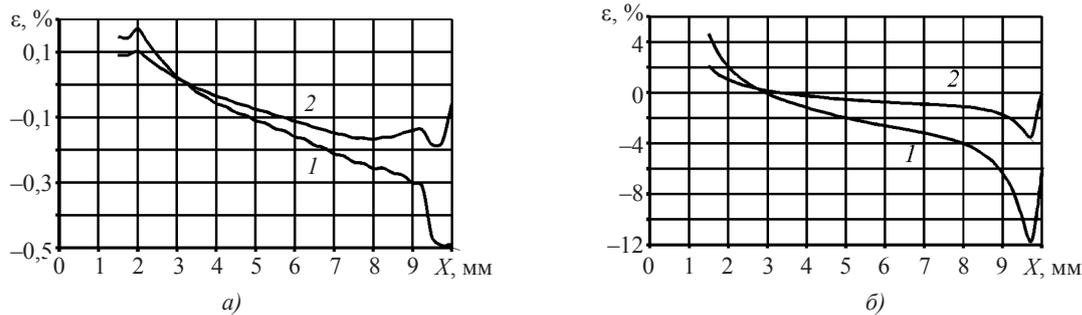


Рис. 10. Распределение сдвиговых деформаций ползучести вдоль стыка в сталях 12X18H10T (а) и 10895 (б) по существующей (1) и предлагаемой (2) технологиям

качественно не изменяется. Но при этом при сварке по предлагаемой технологии несколько уменьшается уровень деформаций (рис. 10).

Продолжительность полного цикла сварки одного узла по существующей технологии составляет 83 мин (см. рис. 3), а по предлагаемой — 59, т. е. предлагаемая технология позволяет сократить затраты времени и, соответственно, энергии и трудоемкость почти на 30%. Сварные соединения сталей 12X18H10T и 10895 при испытаниях разрушаются по стали 10895.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая технология позволяет уменьшить затраты времени на сварку узла почти на 30%. Соответственно уменьшаются затраты электроэнергии и трудоемкость.

2. Характер распределения и уровень пластических деформаций в стыке говорят о том, что качество соединения при использовании предлагаемой технологии остается высоким.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Интенсификация процессов сварки давлением [Текст] / С.М. Гуревич, Г.К. Харченко, А.И. Игнатенко [и др.] // Тез. 8-й науч.-техн. конф. по диффузионному соединению металлических и неметаллических материалов. — М.: Проблемная научно-исследовательская лаборатория диффузионной сварки в вакууме, 1977. — С. 17.
- [2] Казаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов [Текст] / Н.Ф. Казаков. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
- [3] Капралов, Б.П. Технологический процесс диффузионной сварки в вакууме корпусов электропневмоклапанов [Текст] / Б.П. Капралов, А.П. Сигачев, В.И. Козловский // Сварочное производство. — 1985. — № 10. — С. 49–50.
- [4] Каракозов, Э.С. Соединение металлов в твердой фазе [Текст] / Э.С. Каракозов. — М.: Metallurgy, 1976. — 264 с.
- [5] Квасницкий, В.В. Проблема компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния при изготовлении конструкций с применением сварки и родственных технологий [Текст] / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, С.Н. Михайлов // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2011. — № 1 (436). — С. 89–95.
- [6] Матвиенко, М.В. Структура і механічні властивості з'єднань сталей 10895 та 12X18H10T при дифузійному зварюванні у вакуумі [Текст] / М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2009. — № 6 (429). — С. 83–91.
- [7] Матвиенко, М. Удосконалення технології дифузійного зварювання корпусів електромагнітів шляхом визначення напружено-деформованого стану [Текст] / М. Матвиенко, В. Квасницкий // Машинознавство: всеукр. щомісяч. наук.-техн. і вироб. журнал. — 2009. — № 8. — С. 43–47.
- [8] Матвиенко, М.В. Влияние проскальзывания соединяемых поверхностей разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке в вакууме с термоциклированием [Текст] / М.В. Матвиенко, Г.В. Ермолаев, В.В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2012. — № 3–4 (444).
- [9] Матвиенко, М.В. Исследование распределения температуры при диффузионной сварке с индукционным нагревом цилиндрических деталей из разнородных материалов [Текст] / М.В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2012. — № 2 (443). — С. 36–40.

- [10] **Матвиенко, М. В.** Структура, состав и свойства соединений сталей 12X18H10T и 10864 при диффузионной сварке с управлением термомодеформационными процессами [Текст] / М. В. Матвиенко, Л. И. Маркашова, В. В. Квасницкий // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 1 (442). — С. 54–58.
- [11] **Пат. на винахід № 81583.** Спосіб дифузійного зварювання матеріалів [Текст] / Квасницький В. В., Матвієнко М. В., Єрмолаєв Г. В. [та ін.] ; НУК. — К 23 К20/14 ; заявл. 21.11.2006, опубл. 10.01.2008, Бюл. 1.
- [12] Совершенствование технологии диффузионной сварки корпусов электромагнитных клапанов [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко, Б. В. Бугаенко, В. Ю. Волошин // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. праць. — Маріуполь : ПДТУ, 2006. — Вип. 9. — С. 178–183.
- [13] Теория, технология и оборудование диффузионной сварки [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Бачин, В. Ф. Квасницкий, Д. И. Котельников [и др.]. — М. : Машиностроение, 1991. — 352 с.

© В. В. Квасницький, М. В. Матвієнко, Г. В. Єрмолаєв

Надійшла до редколегії 04.12.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012