

DOI 10.15589/jnn20150308
 УДК 621.791
 Л12

RESIDUAL STRESS WHEN BRAZING METAL-CERAMIC PRESSURE SEALS

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПАЙКЕ
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ГЕРМОВВООДОВ

Oleksandr V. Labartkava
 oleksandr.labartkava@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-9825-0192

А. В. Лабарткава
 магистр, ассист.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The stress-strain state arising at brazing metal-ceramic pressure seals has been analyzed. With the use of computer modeling, the levels of residual stresses at various temperatures during cooling were studied. It was found that the main role in the formation of the stress-strain state of the unit is played by the difference in Thermal Coefficient of Linear Expansion (TCLE) of brazed materials, i.e., temperature deformations. Analysis of the tensile stress diagrams showed that they appear on the forming surfaces near the junction with the current lead. As they are getting away from it, they increase at first and then decrease, reaching a maximum at about 2 and 1 mm from the junction on the outer and inner surfaces respectively. It was established that transient plastic deformations develop at temperatures ranging from 900 to 400 °C because of the large difference in TCLE of ceramics and Kovar and low Kovar yield strength in this range. The modeling results showed that the character of the tensile stress fields in ceramics and their change during cooling is not very different, both in the calculation considering only the transient plastic deformations and the compression pressure of 5 MPa and the calculation based on transient plastic deformations and creep deformations at slow cooling with the compression pressure of 5 MPa. The creep deformation developing in the process of slow cooling has little influence on the nature and size of the stresses and strains appearing in the unit.

Keywords: pressure seal; dissimilar materials; stress-strain state; thermodeformation processes.

Анотація. Визначено вплив термодформаційних процесів на залишковий напружено-деформований стан при паянні металокерамічних гермовводів.

Ключові слова: гермоввод; різні матеріали; напружено-деформований стан; термодформаційні процеси.

Аннотация. Определено влияние термодформационных процессов на остаточное напряженно-деформированное состояние при пайке металлокерамических гермовводов.

Ключевые слова: гермоввод; разнородные материалы; напряженно-деформированное состояние; термодформационные процессы.

REFERENCES

- [1] Kvasnitskiy V.V., Labartkava A.I. *Optimizatsiya konstruktсии metallokeramicheskogo uzla na osnove modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Optimization of the metal-ceramic unit construction based on the stress-strain state modeling]. *Problemy tekhniki — Problems of Engineering*, 2009, no. 1, pp. 82–89.
- [2] Lebedev V.K., Kuchuk-Yatsenko S.I., Chvertko A.I. et al. *Mashinostroenie. Tehnologiya svarki, payki i rezki*. [Machine Engineering. Technology of welding, brazing and cutting]. *Mashinostroenie. Entsiklopediya — Machine Engineering. Encyclopedia*, 2006. 768 p.
- [3] Kvasnitskiy V.V., Labartkava A.V., Matvienko M.V. Labartkava A.I. *Optimizatsiya konstruktсии metallokeramicheskogo germovvoda* [Optimization of the metal-ceramic pressure seal construction]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2014, no. 4, issue 454, pp. 99–103.
- [4] Kvasnytskyi V.F., Kvasnytskyi V.V., Kostin O.M., Buhaienko B.V., Labartkava O.V. *Sposib paiannia metallokeramichnykh vuzliv* [Method of metal-ceramic unit brazing]. Patent for utility model UA, no. 67071, 2012.
- [5] Kvasnytskyi V.F., Kvasnytskyi V.V., Kostin O.M., Yermolaiev H.V., Buhaienko B.V., Labartkava O.V., Labartkava A.V. *Sposib paiannia oksydnoi keramiky z metalom* [Method of brazing the metal with oxide ceramics]. Patent for utility model UA, no. 72197, 2012.

- [6] Kvasnitskiy V. V., Kostin A. M., Labartkava A. V. Labartkava Al. V. *Razrabotka tehnologii payki metallokeramicheskikh germovvodov dlya elektronno-luchevykh pushek* [Development of technology of brazing of metal-ceramic pressure seals for electron beam guns]. *Transport and machinebuilding — scientific-technical journal*, 2013, no. 3, issue 28, pp. 55–58.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современной промышленности широко используют металлокерамические узлы [2]. Примером такого узла являются высоковольтные гермовводы электронно-лучевых пушек в установках для сварки и напыления [1], для изготовления которых применяют активную пайку под давлением [6] и согласованные материалы, в частности керамику марки ВК 94-1 и прецизионный сплав 29 НК (ковар), имеющие близкие термические коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). При температурах выше 400 °С ТКЛР коvara резко возрастает, а рабочая температура эксплуатации гермоввода может достигать 600 °С [3].

Пайка гермовводов осуществляется под давлением в 5 МПа при температуре 960 °С припоем, образующимся в результате контактно-реактивного плавления фольги меди и титана с медленным (ступенчатым) охлаждением [4, 5].

Влияние термдеформационных процессов на остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС) при пайке металлокерамических гермовводов на различных этапах охлаждения не изучено, поэтому данная работа актуальна.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Ранее выполненные исследования методом компьютерного моделирования [1] позволили определить влияние повышения толщины коварового токоподвода с 0,3 до 1,2 мм на характер НДС узла.

В работе [3] установлено влияние толщины токоподвода на жесткость конструкции во время эксплуатации. В ней показано, что максимальные

перемещения по X и Y наиболее заметно уменьшаются при увеличении толщины токоподвода с 0,3 до 0,8 мм. При толщине токоподвода 0,8 мм перемещения уменьшаются на 95 % и 86 % для Y и X соответственно. Дальнейший рост толщины токоподвода не приводит к значительному уменьшению перемещений X и Y и практически не оказывает влияния на увеличение жесткости. Оптимальной толщиной токоподвода, исходя из минимальных перемещений узла во время эксплуатации, есть толщина 0,8 мм. В [4–6] разработана технология пайки под давлением гермовводов с толщиной коvara 0,8 мм, но при этой толщине коvara возможно разрушение узла в керамике за счет появления трещин в процессе охлаждения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование напряженно-деформированного состояния узла гермоввода на различных этапах снижения температуры.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Металлокерамические гермовводы для электронно-лучевых пушек в установках для сварки и напыления состоят из пяти керамических колец с наружным диаметром 39 мм, внутренним 25 мм, толщиной 7 мм и четырех токоподводов из коvara [1].

Исходя из конструкции гермоввода, для расчёта НДС выбирается не вся модель, а её часть из двух керамических колец и одного коварного фланца, расположенного между ними (рис. 1, а). Поскольку узел симметричен относительно осевой линии, то решалась осесимметричная задача с кольцевыми конечными элементами типа Plane 182 (рис. 1, б).

Свойства материалов принимались с учетом температуры по литературным данным [1, 3] и результатам собственных исследований (табл. 1).

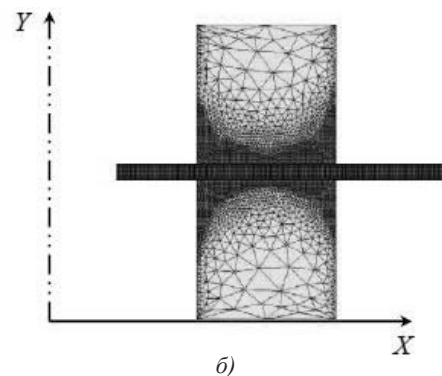
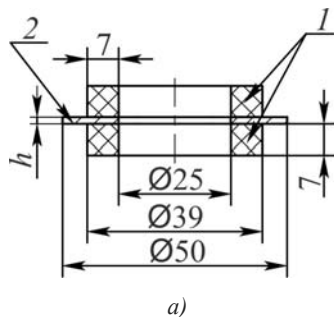


Рис. 1. Общий вид (а) и сечение конечно-элементной модели (б) узла:
1 — керамическое кольцо; 2 — токоподвод из коvara

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов узла, ВК 94-1 (1) и прецизионного сплава 29НК (2)

$T, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-11}, \text{Па}$		μ		ТКЛР, $\alpha \cdot 10^6$		$\sigma_t, \text{МПа}$	
	1	2	1	2	1	2	1	2
20	2,04	2	0,2	0,32	5,5	4,17	—	347
100					6,2	4,17		296
200					6,8	4,17		200
300					7,3	4,17		145
400					7,7	4,17		104
500					8,0	15,6		95
600					8,2	15,6		74
700					8,4	15,6		71,5
800					8,5	15,6		66,8
900					8,6	15,6		53,6

Решались три варианта задачи:

1) упругая задача, охлаждение под давлением сжатия 5 МПа (соответствует быстрому остыванию без учета пластических деформаций в токоподводе);

2) пластическая задача, охлаждение под давлением сжатия 5 МПа (соответствует быстрому остыванию с учетом возникающих при этом пластических деформаций в токоподводе);

3) задача с учетом ползучести ковара, охлаждение под давлением сжатия 5 МПа (соответствует медленному остыванию в течение 6 часов при возникающих пластических деформациях и ползучести в токоподводе).

Из анализа ТКЛР керамики и ковара следует, что при температурах ниже 400 °С они меняются местами, в результате этого идет разгрузка узла, поэтому исследовалось НДС при охлаждении каждые 100 °С до температуры 400 °С.

Поскольку одной из проблем при пайке металло-керамических узлов является появление трещин (разрушение) в керамике в процессе остывания, изучались поля и эпюры осевых напряжений на различных этапах снижения температуры.

Исследование эпюр растягивающих напряжений показало, что они появляются на образующих поверхностях вблизи стыка с токоподводом и по мере удаления от него вначале растут, а затем убывают, достигая максимума на расстоянии около 2 и 1 мм от стыка, на внешней и внутренней поверхностях соответственно (рис. 2).

Уровень растягивающих напряжений на обеих поверхностях в процессе охлаждения (от 900 °С до 400 °С) заметно растет от 1 до 25 МПа и от 20 до 130 МПа на внешней и внутренней поверхностях соответственно.

Вдоль стыка керамики с токоподводом также возникают растягивающие осевые напряжения (рис. 3), по мере снижения температуры они увеличиваются (от 10 МПа при 800 °С до 65 МПа при 400 °С).

Характер распределения эквивалентных напряжений вдоль прослойки неравномерный, при этом в процессе снижения температуры степень неравномерности растет (рис. 4). Максимального значения эквивалентные напряжения достигают на внутренней кромке диска, постепенно уменьшаясь по мере удале-

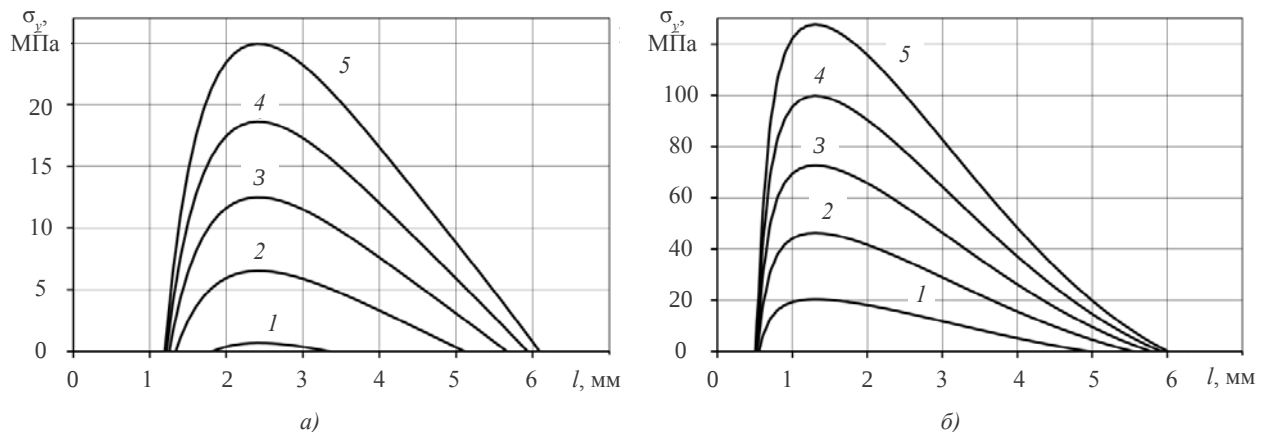


Рис. 2. Эпюры растягивающих осевых напряжений на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях керамики (вариант задачи 1) при температурах 800 °С (1), 700 °С (2), 600 °С (3), 500 °С (4), 400 °С (5)

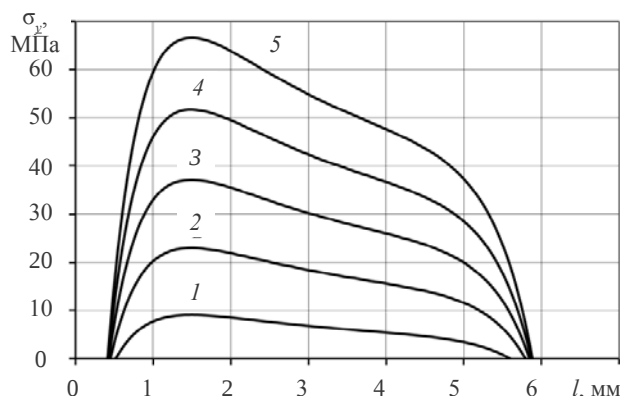


Рис. 3. Эпюры растягивающих осевых напряжений вдоль стыка керамики с токоподводом (вариант задачи 1) при температурах 800°C (1), 700°C (2), 600°C (3), 500°C (4), 400°C (5)

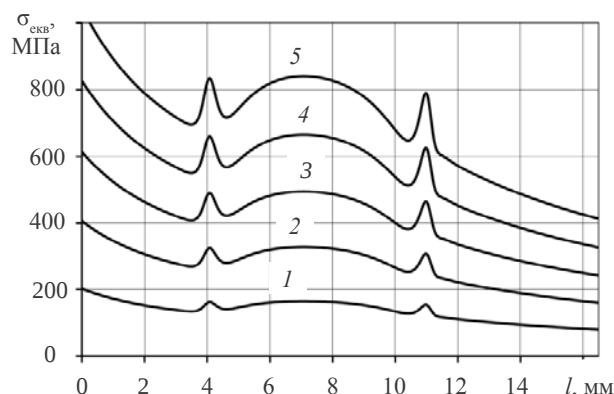


Рис. 4. Эпюры эквивалентных напряжений в токоподводе (вариант задачи 1) при температурах 800°C (1), 700°C (2), 600°C (3), 500°C (4), 400°C (5)

ния от нее. На кромках стыка, в точках своих концентраций, эквивалентные напряжения повышаются (наблюдается небольшой всплеск). На внешней кромке диска эквивалентные напряжения минимальны и изменяются в процессе остывания от 100 до 400 МПа.

В пределах стыка напряжения распределены более равномерно, изменяясь от минимума у кромок стыка до максимума в его средней части в пределах около 150 МПа при 800°C и 750...850 МПа при 400°C.

Общий высокий уровень эквивалентных напряжений в токоподводе должен вызывать пластические деформации в нем, что неизбежно влияет на напряженное состояние узла в целом.

Анализ результатов моделирования с учетом кратковременных (мгновенных) пластических деформаций при быстром охлаждении (вариант задачи 2) показал, что так же, как и в упругом варианте, растягивающие напряжения в керамике появляются уже при 800°C и сосредоточены, главным образом, в зоне стыка, а также вблизи наружной и внутренней поверхностей.

Характер и размеры зон растяжения на поверхностях керамики мало меняются вплоть до 400°C, уровень напряжений в них не превышает 40 МПа. В сечении по стыку небольшие растягивающие напряжения появляются при 800°C и достигают 13 МПа при 400°C.

Таким образом, уровень максимальных растягивающих напряжений в керамике и размеры зоны их действия в этом варианте значительно отличаются от упругого варианта. Возникновение пластических деформаций в токоподводе создает концентрацию растягивающих напряжений на поверхностях керамики в точках сопряжения с коваром.

Вследствие возникающих пластических деформаций в токоподводе изменяются и эквивалентные напряжения в нем.

Анализ эпюр и их сравнение с вариантом задачи 1 показал, что при охлаждении от 900 до 400°C эквивалентные напряжения по всей длине распределены равномерно на уровне предела текучести, соответствующего изменяющейся температуре.

Следовательно, кратковременные пластические деформации развиваются в диапазоне температур от 900 до 400°C, что объясняется большим различием ТКЛР ковара и керамики и низким значением предела текучести ковара в этом диапазоне.

Этот вывод подтверждается изучением эпюр пластических деформаций (рис. 5 и 6).

Кратковременные пластические деформации вдоль оси x (ϵ_x — радиальные) равномерно растут от 900 до 400°C и дальше остаются постоянными вплоть до полного охлаждения. Деформации удлинения в пределах стыка составляют 0,35%, а укорочения за его пределами до –0,3%, при этом наблюдается их резкий всплеск в точках концентрации напряжений (рис. 5, а).

Кратковременные пластические деформации укорочения вдоль оси y (ϵ_y — осевые) наблюдаются по всей длине, кроме точек концентрации напряжений, где они переходят в удлинения (рис. 5, б). Уровень их после остывания на внутренней части токоподвода около –0,3%, на внешней –0,1% и в пределах стыка –0,7%. Закономерность их изменения по мере снижения температуры полностью совпадает с деформациями в радиальном направлении.

В окружном направлении (ϵ_z) пластические деформации удлинения максимальной величины (около 0,6%) достигают на внутренней кромке токоподвода, заметно уменьшаясь в процессе удаления от нее, стабилизируются в пределах стыка и снова уменьшаются при приближении к наружной кромке токоподвода (рис. 6, а). Здесь также имеются небольшие всплески в точках концентрации. Закономерность из-

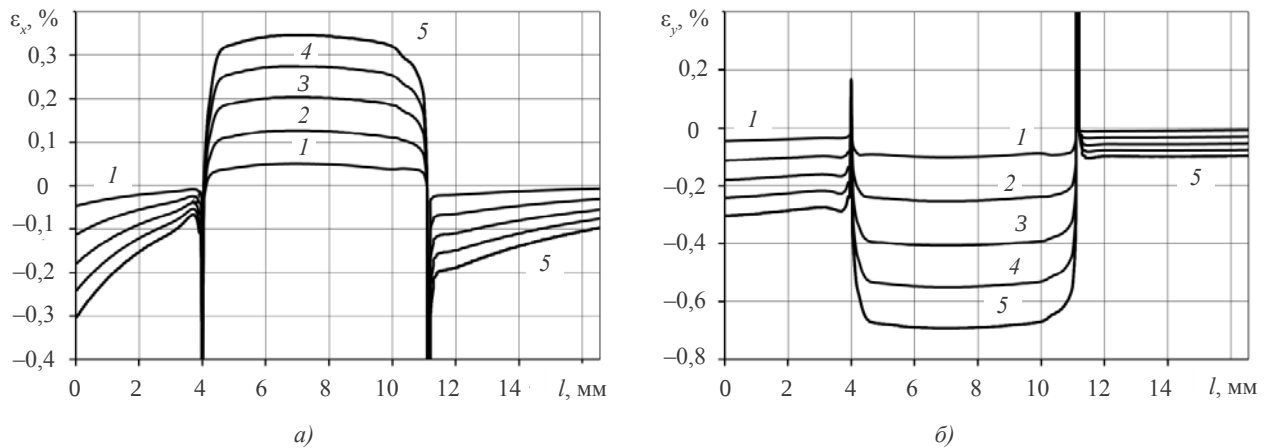


Рис. 5. Эпюры кратковременных пластических деформаций ε_x (а) и ε_y (б) на поверхности токоподвода (вариант задачи 2) при температурах 800 °С (1), 700 °С (2), 600 °С (3), 500 °С (4), 400 °С (5)

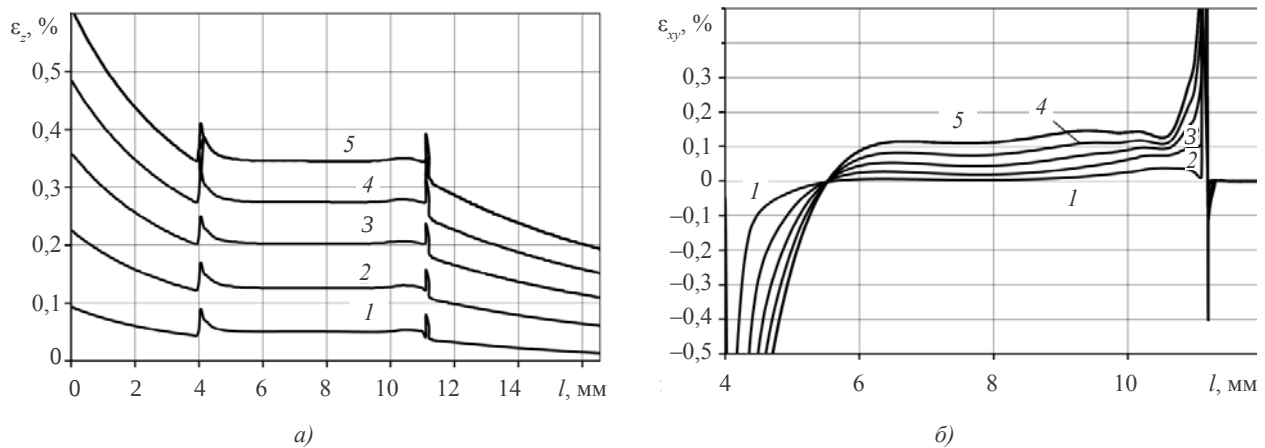


Рис. 6. Эпюры кратковременных пластических деформаций ε_x (а) и ε_y (б) на поверхности токоподвода (вариант задачи 2) при температурах 800 °С (1), 700 °С (2), 600 °С (3), 500 °С (4), 400 °С (5)

менения в процессе остывания та же, что и других осевых составляющих деформаций.

Сдвиговые деформации (ε_{xy}) сосредоточены только в пределах стыка, где они от максимумов разных знаков на его кромках (в точках концентрации) снижаются до нуля на расстоянии около 1 мм от левой кромки (рис. 6, б).

Изучение эпюр эквивалентных пластических деформаций показывает, что их характер распределения и уровень определяются осевыми деформациями (ε_y) в пределах стыка и окружающими (ε_z) за его пределами с наружной и внутренней стороны.

Основной причиной появления пластических деформаций за пределами стыка можно считать изменение (увеличение) диаметра части токоподвода, находящейся в пределах стыка, вследствие приложения давления сжатия в процессе остывания узла.

Результаты моделирования с учетом не только кратковременных пластических деформаций, но и деформаций ползучести при медленном охлаждении

(вариант задачи 3) показали, что при сжатии давлением 5 МПа характер полей растягивающих напряжений в керамике и их изменение в процессе остывания мало отличаются от варианта задачи 2.

Таким образом, поле кратковременных пластических деформаций вдоль оси x при всех режимах охлаждения полностью формируется в течение первых 500 градусов (с 900 до 400 °С).

ВЫВОДЫ. 1. Методом компьютерного моделирования впервые определены уровни остаточных напряжений при различных температурах во время охлаждения.

2. Установлено, что главную роль в образовании напряженно-деформированного состояния узла играет различие ТКЛР соединяемых материалов, то есть температурные деформации.

3. Результаты моделирования показали, что характер полей растягивающих напряжений в керамике и их изменение в процессе остывания мало отличаются, как при расчёте с учетом только кратковременных

пластических деформаций и давлением сжатия 5 МПа, так и при расчете с учетом кратковременных пластических деформаций и деформаций ползучести при медленном охлаждении с давлением сжатия 5 МПа.

4. Деформации ползучести, развивающиеся в процессе медленного охлаждения, мало влияют на характер и величину появляющихся в узле напряжений и деформаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Квасницький, В. В.** Оптимизация конструкции металлокерамического узла на основе моделирования напряженно-деформированного состояния [Текст] / В. В. Квасницький, Ал. В. Лабарткава // Проблеми техніки : Науково-виробничий журнал. — Одеса : Одеський національний морський університет, Хмельницький національний університет. — № 1. — 2009. — С. 82–89.
- [2] **Машиностроение. Энциклопедия** [Текст] / Ред. совет : К. В. Фролов (пред.) и др. // Машиностроение. Технология сварки, пайки и резки. — Т. 3–4 / В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Чвертко и др.; под. ред. Б. Е. Патона. — 2006. — 768 с.
- [3] **Оптимизация конструкции металлокерамического гермоввода** [Текст] / В. В. Квасницький, Ал. В. Лабарткава и др. // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2014. — № 4 (454). — С. 99–103.
- [4] **Патент на корисну модель № 67071, UA МПК (2011.11). C04B 37/02, B23K 1/00, B23K 35/30.** Спосіб паяння металокерамічних вузлів [Текст] / В. Ф. Квасницький, В. В. Квасницький, О. М. Костін, Б. В. Бугаєнко, О. В. Лабарткава; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; заявл. 23.08.2011, № U 2011 10301; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.
- [5] **Патент на корисну модель № 72197, UA МПК (2012.01). C04B 37/02, B23K 1/00, B23K 35/30.** Спосіб паяння оксидної кераміки з металом [Текст] / В. Ф. Квасницький, В. В. Квасницький, О. М. Костін, Г. В. Єрмолаєв, Б. В. Бугаєнко, О. В. Лабарткава, А. В. Лабарткава; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; заявл. 31.01.2012, № U 2012 01005; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.
- [6] **Разработка технологии пайки металлокерамических гермовводов для электронно-лучевых пушек** [Текст] / В. В. Квасницький, А. М. Костин, А. В. Лабарткава, Ал. В. Лабарткава // Transport and machinebuilding.— Scientific-technical journal. — Tbilisi : Publishing House «Transport and machinebuilding», 2013. — № 3 (28). — P. 55–58.

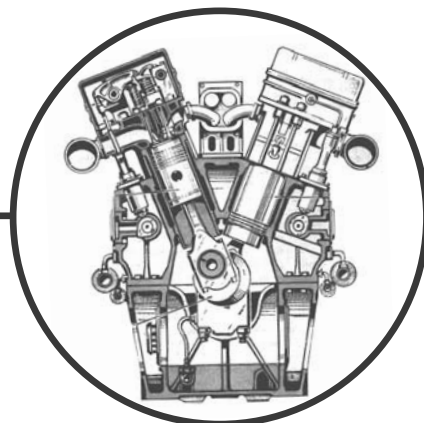
© О. В. Лабарткава

Надійшла до редколегії 11.06.2015

Статтю рекомендує до друку
канд. техн. наук, проф. НУК *Г. В. Єрмолаєв*

ЕНЕРГЕТИКА

Кантор С. А.
Куда С. А.
Мітіков Ю. А.
Радченко А. М.



Збірник
наукових праць
2015