

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-16-22

*М. П. Королев, м. н. с., Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук, В. О. Харламов, канд. техн. наук,
С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН, В. И. Лысак, академик РАН*

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ ТИТАНА
С АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫМ СПЛАВОМ**

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

В статье приведены результаты экспериментов по сварке взрывом титана с алюминиево-магниевыми сплавами с предварительным подогревом и охлаждением неподвижной пластины, а также показаны особенности разрушения соединений.

Ключевые слова: сварка взрывом, алюминиево-магниевый сплав, АМг5, АМг6, титан, ВТ1-0, предварительный подогрев, предварительное охлаждение, разрушение, динамическая рекристаллизация

M. P. Korolev, E. V. Kuz'min, V. O. Kharlamov, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

**INFLUENCE OF THERMAL CONDITIONS WHEN EXPLOSIVE WELDING TITANIUM
WITH ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY**

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

The article presents the results of experiments on explosion welding of titanium with aluminum-magnesium alloys with preheating and cooling of a fixed plate, and also shows the features of the destruction of joints.

Keywords: explosion welding, aluminum-magnesium alloy, AMg5, AMg6, titanium, VT1-0, preheating, pre-cooling, destruction, dynamic recrystallization

Сварка взрывом титана с алюминиево-магниевыми сплавами АМг5 и АМг6 представляет собой сложную задачу. Зачастую соединения при сварке взрывом получить не удастся, или же они имеют низкую прочность и расслоения по краям пластин.

В работе [1] показано, что при сварке по угловой схеме соединение между ВТ1-0 и АМг6 образуется в узком диапазоне энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, за пределами которого происходит расслоение по границе соединения.

В работе [2] приведены результаты исследования прочности соединения ВТ1-0 + АМг6 на отрыв слоев, согласно которым прочность композита после сварки взрывом остается невысокой и изменяется в широком диапазоне от 20 до 180 МПа.

Ранее нами было показано, что при одинаковых условиях сварки, соединения АМг2 и АМг3 с титаном обладают большей прочностью, в сравнении с аналогичными соединениями АМг5, а также был сделан вывод о том, что оплавленные участки в соединении

являются причиной плохой свариваемости этой пары материалов. Кроме того, было обнаружено, что при разрушении соединения по границе между материалами в ходе испытаний на отрыв слоёв, на поверхности титана остаются участки, покрытые слоем АМг5 [3].

Причины плохой свариваемости этой пары не до конца ясны. Существует предположение, что узкий диапазон области свариваемости ряда алюминиевых сплавов объясняется их высокими механическими свойствами и низкой температурой солидус, вблизи которой их прочность оказывается на порядок ниже, чем при комнатной температуре [4]. Повышение прочности алюминиевых сплавов означает увеличение критической энергии $W_{2кр}$, необходимой для образования соединения, а с увеличением степени легирования уменьшается температура солидус, при которой наступает термическое разупрочнение и материал оказывается не способен сопротивляться действию растягивающих напряжений, вызванных волной

разгрузки. Ситуация усугубляется тем, что с повышением прочности алюминиевого сплава, возрастает также и степень локализации пластической деформации, а следовательно, и температуры вблизи границы соединения, что ведёт к снижению верхней границы свариваемости $W_{2пр}$. В доказательство такого подхода приводятся исследования, согласно которым понижение температуры сплава АМг6 в процессе сварки способствует повышению прочности его соединений с титаном [4].

Исходя из этих рассуждений, свариваемость пары титан + алюминиево-магниевого сплав напрямую связана с температурным фактором и эффектами разупрочнения, вызванными нагревом.

Цель данной работы заключалась в проверке предположения о влиянии температуры на свариваемость данной пары, а также экспериментальном изучении возможности использования термического воздействия для повышения качества соединений титана с алюминиево-магниевыми сплавами.

Материалы и методы проведения исследований

Исследования образцов ВТ1-0+АМг5 после сварки с предварительным подогревом проводили на образцах, полученных в ходе эксперимента, методика проведения и результаты которого опубликованы в работе [5].

На рис. 1 приведена схема эксперимента по сварке с предварительным охлаждением неподвижной пластины. Неподвижную пластину из алюминиевого сплава (3) перед сваркой помещали в ёмкость с жидким азотом (1) и выдерживали до окончания кипения азота, после чего перемещали на основание (5), устанавливали термопару (4) и метаемую пластину (7) с зарядом ВВ (8). Чтобы исключить выпадение инея на поверхности охлаждённой пластины, сборку сварочного пакета осуществляли внутри контейнера (2), в котором за счёт активного испарения азота из ёмкости (1) создавалась атмосфера из чистого азота с низкой влажностью.

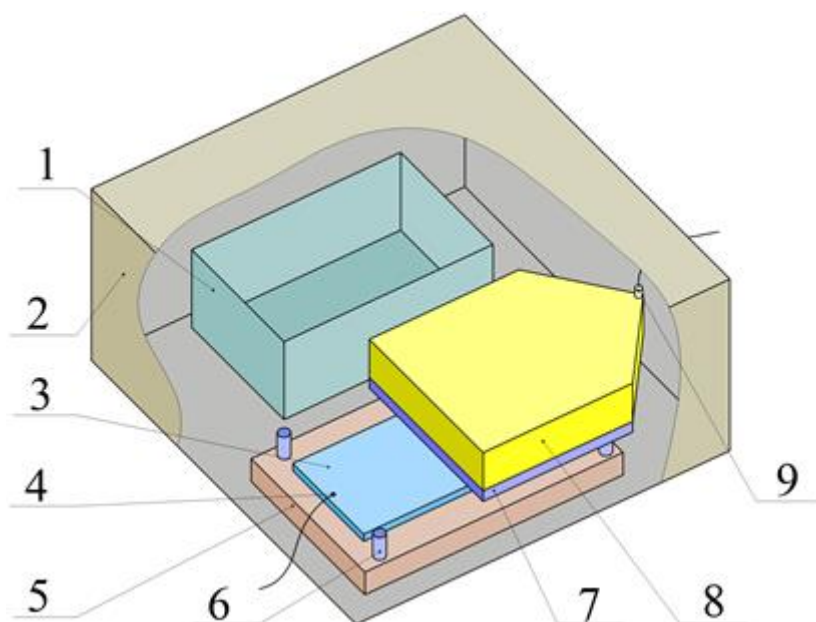


Рис. 1. Схема сварки с охлаждением неподвижной пластины (метаемая пластина и заряд условно рассечены): 1 – ёмкость с жидким азотом; 2 – закрытый контейнер; 3 – неподвижная пластина; 4 – термопара; 5 – основание; 6 – сварочный зазор; 7 – метаемая пластина; 8 – заряд ВВ; 9 – детонатор

Для проведения эксперимента была выбрана пара ВТ1-0 + АМг6. Режимы сварки выбраны близкими к верхней границе области свариваемости (табл. 1). Температура неподвижной пластины непосредственно перед сваркой составила -95°C.

Исследования микроструктуры проводили на электронном растровом микроскопе

сварке.

Изучение поверхностей разрушения показало, что на титановой части пластины в обоих случаях оставалась прослойка АМг6 (рис. 2), однако доля площади поверхности титана, занятая прослойкой различалась: 76% при сварке с охлаждением и 96% при обычной сварке.

Режимы сварки с предварительным охлаждением

Материалы	Толщины $\delta_1 + \delta_2$, мм	Тип ВВ, (аммонит/песок), %	Высота заряда H , мм	Сварочный зазор h , мм	Скорость точки контакта V_k , м/с	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения γ , °	Энергия пластической деформации W_2 , МДж/м ²
ВТ1-0 + АМг6	4+6	67/33	35	10	2232	596	15,3	1,22

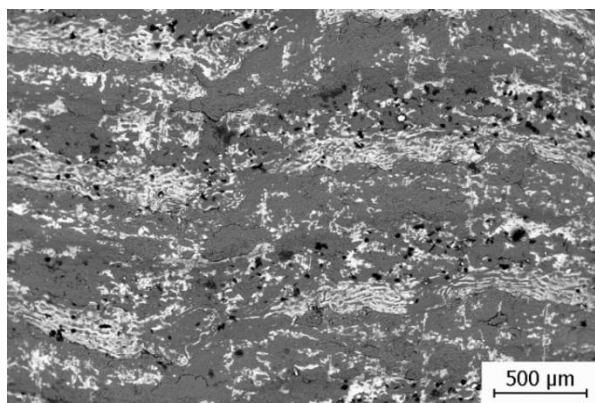
FEI Versa 3D. Изучение зёрненного строения проводили в ионном свете с регистрацией вторичных электронов при помощи детектора Эверхарта-Торнли.

Результаты и их обсуждение

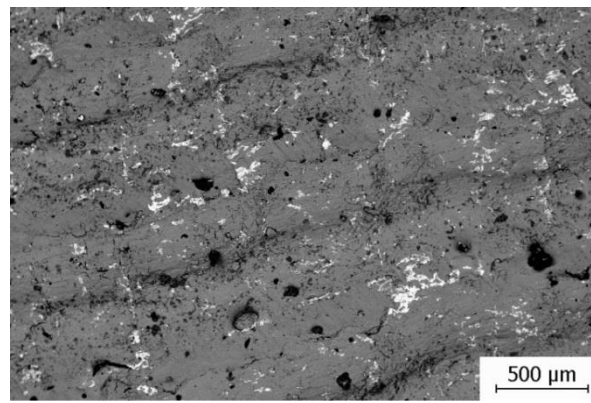
В результате проведенного эксперимента по сварке с предварительным охлаждением неподвижной пластины, соединения между ВТ1-0 и АМг6 не было получено ни в случае сварки с охлаждением, ни при обычной

сварке. Поверхность прослойки имеет в основном гладкий микрорельеф с разнонаправленными бороздками, что, по всей видимости, отражает хрупкий тип разрушения, а различное направление бороздок указывает на распространение трещин из разных очагов.

Исследование зеренного строения прослойки АМг6 на поверхности титана показало, что материал прослойки состоит из равноосных зёрен с размерами меньше 1 мкм.



а



б

Рис. 2. Поверхность ВТ1-0 с прослойкой АМг6 после расслоения при сварке с охлаждением (а) и при обычной сварке (б) (светло-серый – титан, тёмно-серый – АМг6)

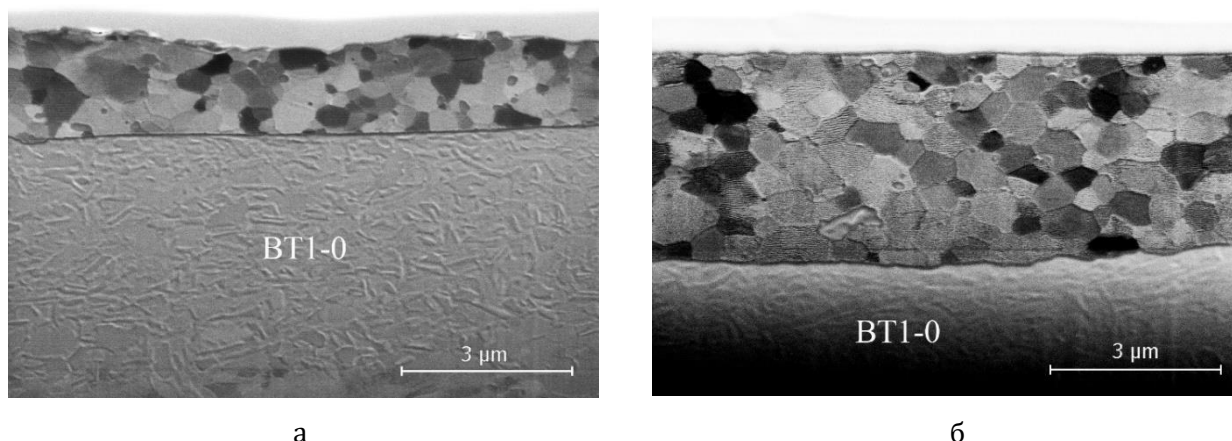


Рис. 3. Зёрненное строение прослойки АМг6 на поверхности ВТ1-0 при сварке с охлаждением (а) и при обычной сварке (б)

Средний размер зерна в прослойке при сварке с охлаждением оказался меньше, чем в контрольном образце и составил 0,4 мкм, против 0,56 мкм, соответственно (рис. 3). Толщина прослойки при сварке с охлаждением также оказалась меньше, чем при сварке при нормальной температуре и составила в среднем 1,7 мкм против 3,5 мкм в контрольном образце.

По данным литературы, механизмом формирования такой ультрамелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах является динамическая рекристаллизация, которая протекает под действием пластической деформации [6]. Появление прослойки рекристаллизованных измельченных зёрен вблизи границы соединения, по всей види-

мости, является следствием высокой степени локализации деформаций в этой зоне.

Поверхность АМг6 после соударения также имела гладкий рельеф. При сварке с охлаждением до -95°C , на поверхности АМг6 были обнаружены участки оплавленного металла, рельеф которых был сформирован гребнями, характерными для вязкого типа разрушения, что вероятно является свидетельством того, что в момент расслоения оплавы находились в жидком состоянии (рис. 4, а).

Изучение зёрненной структуры АМг6 в поверхностном слое неподвижной пластины показало, что при сварке с охлаждением и при обычном способе сварки на глубине около 7 мкм от поверхности материал имел

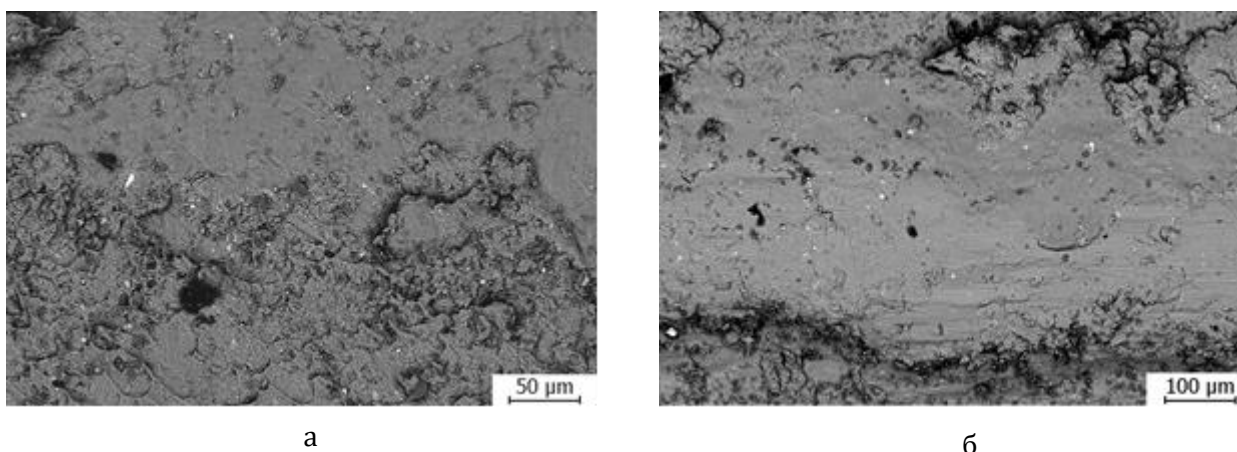


Рис. 4. Вид поверхности АМг6 после расслоения при сварке с охлаждением (а) и при обычной сварке (б)

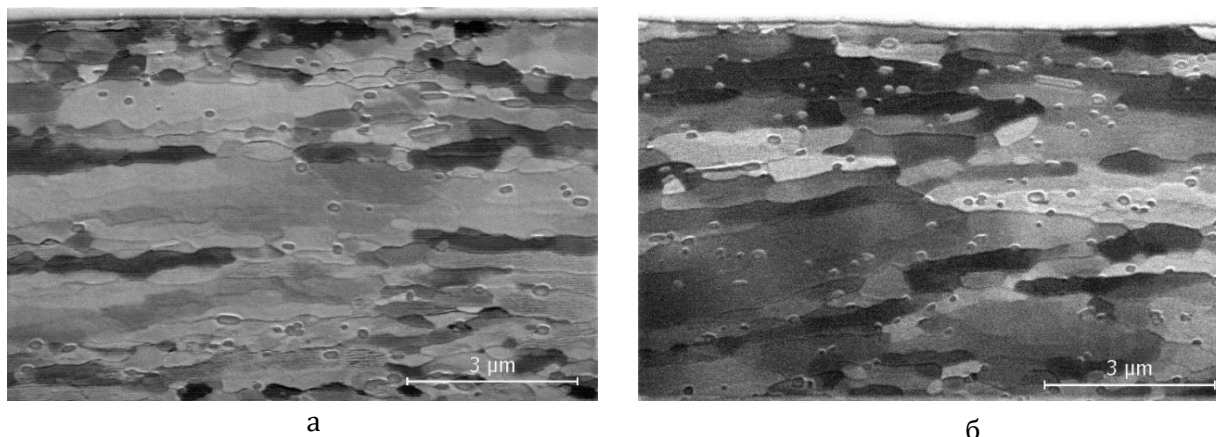


Рис. 5. Зёрненное строение АМг6 в поверхностном слое после расслоения при сварке с охлаждением (а) и при обычной сварке (б)

схожее строение (рис. 5). Структура АМг6 в поверхностном слое обоих образцов состояла из крупных вытянутых зёрен шириной 0,2-1 мкм и длиной 1,5-10 мкм, с развитой субструктурой внутри, а также мелких удлиненных зёрен шириной 0,2-0,4 и длиной 0,4-1,7 мкм.

При сварке ВТ1-0+АМг5 с предварительным подогревом до 200°C образования соединения не произошло, в то время как контрольный образец сварился и прочность его составила 144 МПа. На поверхности пластин после соударения сформировался волновой профиль с длиной волны около 400 мкм. Изучение изломов расслоившегося после сварки с подогревом до 200°C соединения, показало, что практически вся поверхность

титана была покрыта прослойкой АМг5, толщиной около 4,5 мкм (рис. 6, а). Зёрненная структура прослойки АМг5 состояла из равноосных рекристаллизованных зёрен размерами менее 1 мкм (рис. 6, б).

Поверхность АМг5 имела в основном гладкий рельеф с бороздками (рис. 7, а). Области с вязким разрушением соответствовали оплавленным участкам, располагавшимся вблизи вершин волнового профиля. Структура поверхностного слоя пластины АМг5 состояла из крупных вытянутых зёрен размерами 1-3 мкм в ширину и до 15 мкм в длину с развитой субструктурой внутри, а также небольшого количества мелких зёрен с размерами менее 1 мкм (рис. 7, б).

Как показали результаты исследования,

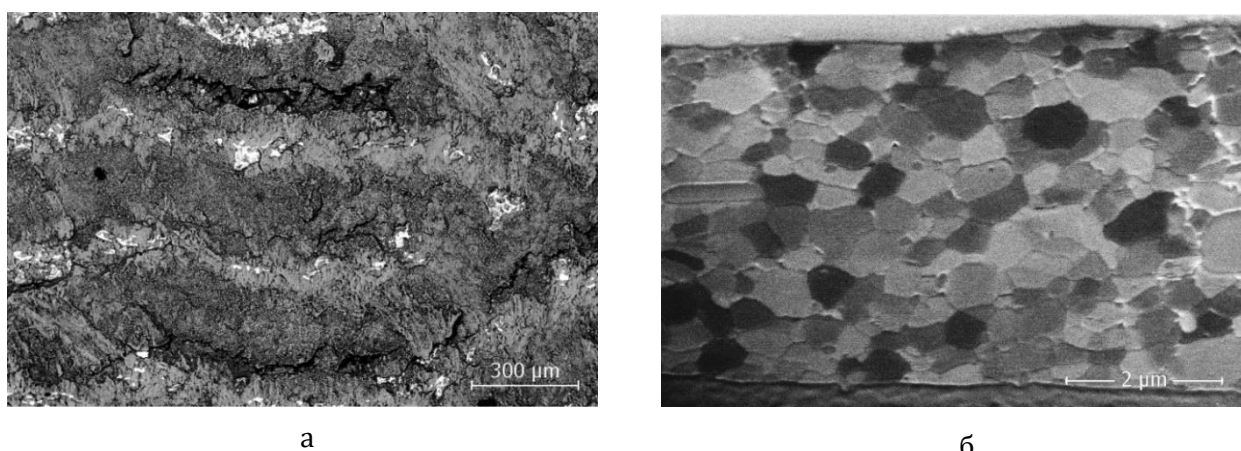
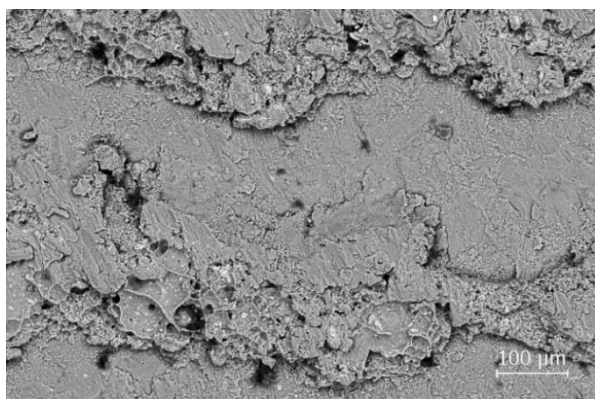
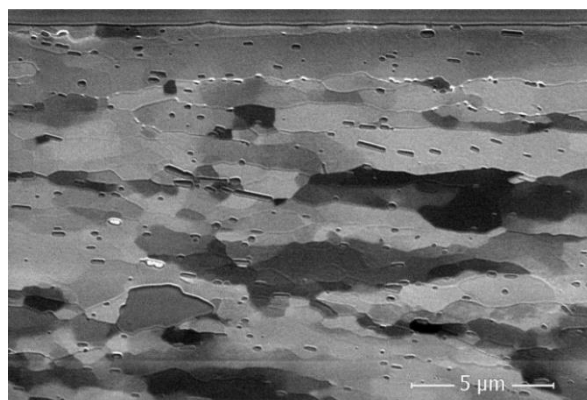


Рис. 6. Поверхность титановой пластины после разрушения при сварке с подогревом до 200°C (а) и зёрненная структура прослойки АМг5 на поверхности титана (б)



а



б

Рис. 7. Поверхность АМг5 после расслоения при сварке с подогревом до 200°С (а) и зёрненная структура поверхностного слоя АМг5 (б)

предварительный подогрев и охлаждение алюминиевого сплава не способствуют улучшению свариваемости пары титан + алюминиево-магниевый сплав. Причем, как в случае подогрева или охлаждения, так и в случае контрольного образца разрушение соединения происходит по приграничной зоне алюминиевого сплава и имеет хрупкий характер. На поверхности титана после разрушения остаётся слой алюминиевого сплава, состоящий из рекристаллизованных зёрен с размерами менее 1 мкм, в то время как структура поверхностного слоя алюминиевой пластины состоит из относительно крупных удлиненных зёрен. Полученный результат указывают на то, что «слабым местом» соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом является приграничная зона алюминиевого сплава, а именно граница между рекристаллизованным слоем на границе и основным металлом со структурой деформационного происхождения. При этом, предварительный подогрев и охлаждение алюминиевой пластины, хотя и могут повлиять на размер рекристаллизованных зёрен и толщину прослойки, однако не оказывают существенного влияния на структуру приграничной зоны и не меняют характера разрушения соединения. В качестве вероятных причин разрушения материала по приграничной зоне можно назвать потерю пластичности и охрупчивание ме-

талла в результате динамической рекристаллизации [7], концентрацию напряжений на границе разнотермических областей [8], действие термических напряжений, возникающих вследствие высокого градиента пластической деформации и температуры вблизи границы и т.д.

Выводы

1. Установлено, что предварительный подогрев и охлаждение алюминиевого сплава не способствуют улучшению свариваемости пары титан + алюминиевый сплав при сварке взрывом.

2. Обнаружено, что разрушение соединений титана ВТ1-0 с алюминиево-магниевыми сплавами АМг5 и АМг6 после сварки взрывом происходит по приконтактной области алюминиевого сплава по границе между областями с различной структурой, в результате чего на поверхности титана остается прослойка алюминиевого сплава, состоящая из рекристаллизованных зёрен размерами менее 1 мкм.

Библиографический список

1. Структура и микромеханические свойства полученного сваркой взрывом биметалла ВТ1-0 + АМг6 / Л. М. Гуревич, А. И. Богданов, В. О. Харламов, А. Г. Серов, С. Ю. Оноколов // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2018. – № 11 (221). – С. 34-38.
2. Almg6 to titanium and almg6 to stainless steel weld interface properties after explosive welding / A. Y. Mala-

khov, I. V. Saikov, I. V. Denisov, N. N. Niyezbekov // Metals. – 2020. – Vol. 10. – No 11. – P. 1-13.

3. Сварка взрывом алюминиево-магниевых сплавов с титаном вблизи нижней границы области свариваемости / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. - Волгоград, 2022. – № 11 (270). – С. 21-28.

4. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – Москва : Издательство "Машиностроение-1", 2005. – 544 с.

5. Сварка взрывом ВТ1-0+АМг5 с предварительным подогревом / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – Волгоград, 2022. – № 6 (265). – С. 83-89.

6. Пуарье, Ж.-П. Ползучесть кристаллов: механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах / Ж.-П. Пуарье ; перевод с англ. В. В. Костоглодова, С. В. Соболева; под ред. Н. В. Жаркова. – Москва : Мир, 1988. – 287 с.

7. Боголюбова, Д. Н. Исследование закономерностей проявления эффекта динамической рекристаллизации в металлах / Д. Н. Боголюбова, А. Е. Гвоздев, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 276-286.

8. Study of material recrystallized regions on deformation and cracking behaviours in cast steel brake discs / X. Xie, Z. Li, J. P. Domblesky, Z. Yang, W. Li, J. Han // Engineering failure analysis. – 2022. – Vol. 140. – P. 106508.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ
в рамках научного проекта №15/463-22