

УДК 621.791.722

# Влияние технологических параметров на качество сварного соединения при электронно-лучевой сварке микрошвов алюминиевых сплавов

**А.Е. Зимаков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Technological parameters influence on the welded joint quality in electron beam welding of the aluminum alloy micro-seams

**A.E. Zimakov**

Bauman Moscow State Technical University

Для сварных соединений из алюминиевых сплавов характерно наличие включений оксидных пленок, непроваров, несплавлений и нарушений формы сварного шва. Приведены варианты технологических приемов удаления устранимых дефектов путем изменения конструкции оснастки. В научно-технической литературе в основном предлагаются способы для устранения оксидных включений в сварных швах, выполненных дуговой сваркой, или для образцов с толщиной более 1 мм. Этот дефект является неустранимым для рассмотренного тонкостенного соединения толщиной менее 1 мм. Для исключения оксидных включений в сварном шве предложено проводить операции подготовки и сварки деталей в одной сверхвысоковакуумной кластерной машине.

**EDN:** OLOCNS, <https://elibrary/olocns>**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, оксидные включения, подготовка деталей, устранение дефектов шва, вакуумные соединения

Welded joints made of the aluminum alloys are characterized by presence of the oxide film inclusions, lack of fusion, faulty fusion and irregular weld seam shape. The paper provides options of the technological methods to eliminate the removable defects by changing the equipment design. Scientific and technical literature mainly proposes methods for eliminating oxides in the welding seams made by the arc welding or for samples with the thickness of more than 1 mm. This defect is irreparable for the considered thin-walled joint with the thickness of less than 1 mm. To eliminate oxide inclusions in the welding seam, the paper proposes to carry out preparation and welding operations in one ultra-high-vacuum cluster machine.

**EDN:** OLOCNS, <https://elibrary/olocns>**Keywords:** electron beam welding, oxide inclusions, part preparation, seam defects elimination, vacuum joints

Исследование направлено на совершенствование технологии подготовки и сварки деталей, изготовленных из алюминиевого сплава. Включение оксидных пленок в металл в сварных швах (СШ) и несплавление являются концентраторами механических напряжений в СШ, что приводит к образованию трещин при циклической нагрузке и последующей разгерметизации вакуумных соединений (например, в электровакуумных приборах) [1].

Цель работы — устранение в СШ оксидных пленок, непроваров, несплавления и нарушения формы СШ.

Объектом исследования являлось сварное соединение двух деталей из сплава АМц, выполненное электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Геометрические размеры сварных образцов малы: исследование проводили на микрошвах с глубиной проплавления не более 0,5 мм.

Основные исследования СШ, полученных ЭЛС, направлены на подбор режимов сварки, а также на определение геометрических параметров СШ и устранение пористости сварных соединений толстостенных конструкций (более 2 мм) [2].

На глубину проплавления влияет тепловая мощность электронного луча, выделяемая в процессе ЭЛС, которая зависит от ускоряющего напряжения и силы тока луча. Так как при возрастании ускоряющего напряжения или силы тока луча увеличивается глубина проплавления [3, 4], указанные технологические параметры были исключены из рассмотрения.

Качество сварного соединения контролировали путем металлографических исследований. Выполняли полировку сварного соединения и химическое травление в смеси кислот, чтобы

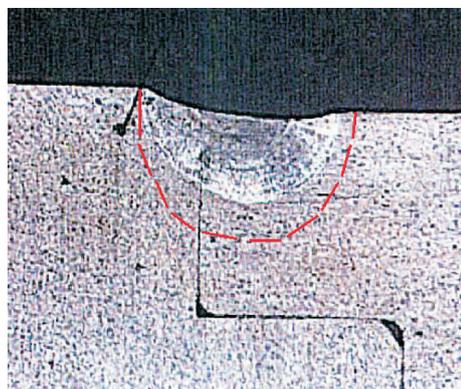
выявить границы зоны металла, подвергшегося расплавлению. Также травление позволяет обнаружить внутренние дефекты: поры, включения других материалов, трещины, неоднородности, несплавления, нарушения формы СШ и др. [5]. После травления образцы фотографировали на цифровом микроскопе. Для определения границ оплавления использовали холодный свет, а для выявления оксидных включений — теплый. Сварку осуществляли остросфокусированным электронным лучом при ускоряющем напряжении 25 кВ и силе тока 8 мА.

Анализ результатов металлографического исследования показал, что образцы имеют различную форму сварочной ванны с глубиной проплавления 0,26...0,50 мм. Обнаружены следующие дефекты: включения оксидных пленок, несплавление, непровар и нарушение формы СШ.

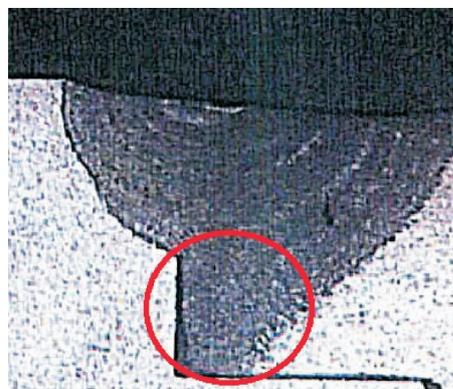
Оксидное включение — твердое включение оксида металла в металле СШ. Непровар — дефект, характеризуемый различием между фактической и номинальной глубинами проплавления (рис. 1, а). Нарушение формы СШ — отклонение от требуемой формы и/или геометрических параметров СШ (рис. 1, б). Несплавление — отсутствие соединения между основным и наплавленным металлами или между отдельными слоями (валиками) (см. рис. 1, б).

СШ деталей должны быть герметичными на уровне не менее  $1,6 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с. Одним из критериев оценки СШ является глубина проплавления.

Непровар приводит к снижению вакуумной плотности СШ, несплавление и нарушение формы СШ, как и оксидные включения, —



а



б

Рис. 1. Внешний вид различных дефектов в СШ: а — непровара, б — несплавления и нарушения формы

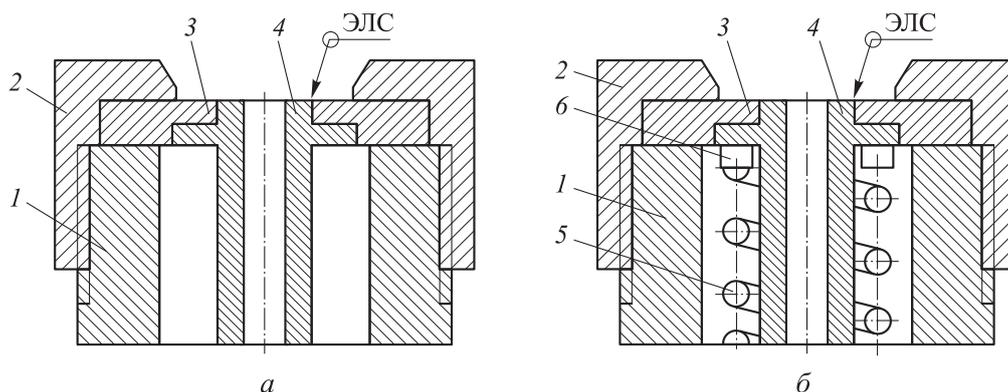


Рис. 2. Схемы сборки старой (а) и новой (б) сварочных оснасток:

1 — медное основание оснастки; 2 — прижимная гайка; 3 — кольцо;  
4 — трубочка; 5 — пружина; 6 — подкладное контактное кольцо

к концентрации напряжений. Это повышает вероятность образования трещин и вызывает разгерметизацию прибора.

В процессе исследования установлено, что дефекты можно подразделить на две группы: устранимые (непровар, несплавление и нарушение формы СШ) и неустраняемые (включения оксидной пленки).

Несплавление, непровар и нарушение формы СШ устраняют путем применения технологических приемов в процессе ЭЛС. Чтобы предотвратить их появление, необходимо повысить точность наведения электронного луча на стык деталей, обеспечить более интенсивный и стабильный теплоперенос и электропроводность [6].

В вакууме камеры электронно-лучевой установки теплоотвод происходит путем непосредственного теплообмена между оснасткой и деталью через контакт поверхностей и теплового излучения (рис. 2, а).

Трубочка 4 контактирует только с кольцом 3, она не касается медного основания оснастки 1 и не имеет заземления и теплоотвода, в отличие от кольца. Электроны уходят в заземленное кольцо и расплавляют его интенсивнее, приводя к неправильной форме СШ.

Чтобы обеспечить заземление и теплоотвод от всех свариваемых деталей (трубочки и кольца 3), основание оснастки было переконструировано. В предлагаемой конструкции медного основания оно имеет контакт с обеими деталями (рис. 2, б). Это приводит к равномерному расплавлению и повышению тепловложения: заземленные детали не накапливают отрицательный заряд и не снижают скорость приближающихся электронов. Пружина 5 обеспечива-

ет разновысотность контактного кольца 6 и основания оснастки, так как плоскости фланца трубочки и кольца 3 всегда будут находиться на разном уровне из-за допусков на изготовление деталей.

Рассмотрим процесс образования оксидных включений. У оксида алюминия температура плавления в 3 раза выше, чем у чистого алюминия [7]. Не расплавляясь в процессе ЭЛС, оксидная пленка перемешивается с расплавленным металлом, застревая в нем при кристаллизации. Алюминий — высокоактивный металл. На алюминии оксидные пленки образуются очень быстро, а скорость роста изменяется обратно пропорционально времени и давлению остатков воздуха в вакуумной камере, что показано на рис. 3 [8]. Здесь точки соответствуют результатам эксперимента, а кривые построены по этим точкам.

Окисление чистого алюминия проводили в течение 10 мин при двух температурах — 673 и 723 К. Окисление происходило по линейному закону, затем по мере формирования оксидной пленки характер кривых приближался к параболическому закону, и через 40...50 мин процесс взаимодействия расплава с газовой фазой заканчивался. Истинная скорость окисления составляла  $(1,40...2,25) \cdot 10^{-4}$  кг · м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>, кажущаяся энергия активации окисления твердого алюминия — 203,1 кДж/моль [9].

В процессе затвердевания оксидная пленка принимала различные форму и положение. Она не всплывала на поверхность, так как плотность оксидной пленки выше, чем у жидкого металла (рис. 4).

Для такого микросоединения нельзя применить традиционные способы устранения

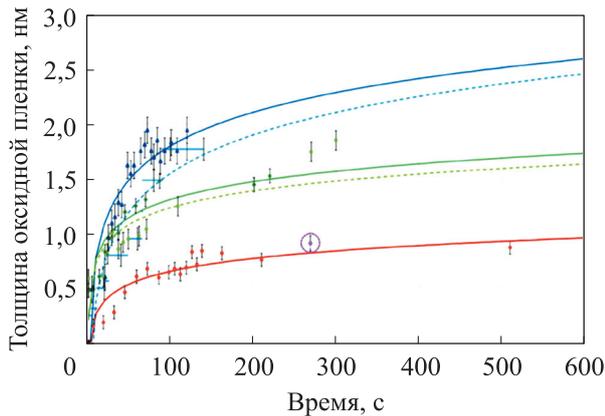


Рис. 3. Зависимости толщины оксидной пленки от времени окисления при различных значениях температуры  $T$  и давления  $p$  воздуха в вакуумной камере:

- ▲ и — —  $T = 723 \text{ K}, p = 3 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$  ( $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ );
- и - - - —  $T = 673 \text{ K}, p = 3 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$  ( $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ );
- ◆ и — —  $T = 723 \text{ K}, p = 3 \cdot 10^{-6} \text{ торр}$  ( $4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ );
- ◇ и - - - —  $T = 673 \text{ K}, p = 3 \cdot 10^{-6} \text{ торр}$  ( $4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ );
- и — —  $T = 723 \text{ K}, p = 3 \cdot 10^{-7} \text{ торр}$  ( $4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ );



Рис. 4. Микрофотография включений оксидной пленки в СШ до эксперимента

оксидной пленки на поверхности алюминия при ЭЛС. К ним относятся: дуговая сварка по хлористым флюсам, дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах на обратной полярности, применение специальных присадочных проволок с определенным химическим составом, обезжиривание органическими растворителями, химическое травление с осветлением, зачистка шабером, термовакuumная обработка с последующей зачисткой шабером и т. д. [10].

Чтобы минимизировать оксидные включения, проводили эксперименты. Для изготовления первых трех образцов использовали технологический маршрут *химическая обработка — вакуумный отжиг — ЭЛС*, а для выполнения вторых трех образцов — *химическая обработка — ЭЛС — вакуумный отжиг*.

Изменение порядка выполнения технологических операций вакуумного отжига и ЭЛС обусловлено тем, что с ростом температуры повышалась скорость образования оксидного слоя на поверхности образца. Это приводило к нарастанию оксидной пленки во время отжига, вследствие чего в камеру сварки образцы попадали с оксидом на поверхности. В процессе ЭЛС расплавленный металл сорбировал кислород из расплавленных оксидных пленок и интенсивно окислялся в перегретой жидкой фазе.

Температура отжига образцов составляла  $590 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  при давлении  $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$  ( $6,66 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ ). Межоперационное хранение в процессе эксперимента не превышало 20 мин. Чем дольше образцы находились на атмосфере, тем толще становился оксидный слой на их поверхности.

После шлифования образцы подвергали повторному травлению смесью кислот  $\text{CrO}_3$  и  $\text{HF}$ , в процессе которого их полировали, чтобы определить структуру и геометрические параметры СШ. Полирование проводили при температуре  $90 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от сорта металла. Так, для сплава АМц рабочая температура, равная  $90 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , является наилучшей. Съем металла для сплавов А00, АМц и Д-16 при температуре  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  и выдержке в течение 60 с составил  $(5 \dots 7) \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2$  [11, 12].

В результате эксперимента избавиться от оксидных включений не удалось (рис. 5).

Можно сделать предположение, что это характерно для всех алюминиевых сплавов. Однако следует ожидать, что условия окисления могут быть разными в зависимости от процентного содержания в сплаве алюминия и других химических элементов.

Необходимо проводить подготовительную операцию, разрушающую оксиды по всей по-

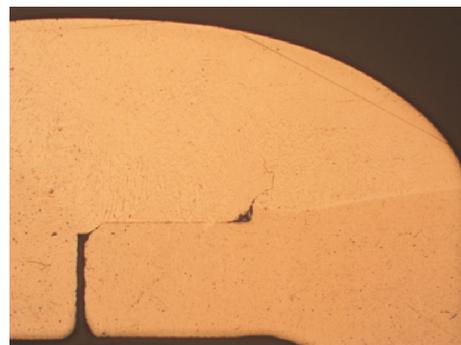


Рис. 5. Микрофотография включения оксидной пленки в СШ после эксперимента

верхности свариваемых образцов. Такой метод был найден в отечественных исследованиях. Полностью избавиться от оксидной пленки алюминия можно только при нагреве в сверхвысоком вакууме  $10^{-10}$  мм рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^{-8}$  Па) и выдержке при температуре 450...600 °С. В таких условиях происходит разложение гидроксида алюминия: соединение распадается с выделением водорода. Возникает диффузия оксида алюминия с металлом. Наблюдается чистая металлическая поверхность [13, 14].

Однако некоторые исследователи считают, что в данном процессе происходит не разложение оксида, а его растворение в основном металле [15].

## Выводы

1. По результатам эксперимента установлено, что устранение микровключений оксидной пленки в СШ, выполненных ЭЛС, является трудно осуществимым процессом, и этого можно достигнуть только при определенных параметрах.

2. При устранении дефектов геометрических параметров СШ необходимо учитывать электропроводность сварного узла и оснастки.

Конфигурация оснастки и способ расположения в ней деталей должны обеспечивать равномерный сток заряда в землю через систему заземления рабочей камеры электронно-лучевой установки. Также сварочная оснастка должна создавать равномерный теплоотвод от зоны ЭЛС в обеих деталях. Соблюдение этих условий обеспечит равномерное расплавление обеих деталей с образованием симметричной сварочной ванны.

3. Помимо классической обработки методом химического травления в кислотной смеси следует провести высоковакуумный отжиг образцов для полного разложения оксидов и последующую сварку без их контакта с атмосферой.

4. Подтверждение исследований о разложении оксида алюминия при высоковакуумном нагреве является актуальным, но требует наличия дорогостоящих высоковакуумных печей, позволяющих осуществлять равномерный нагрев до контролируемой температуры. Нагрев также можно выполнять расфокусированным электронным лучом, однако будет сложно контролировать температуру детали и равномерность нагрева, что остается актуальным вопросом.

## Литература

- [1] Миронов А.А. Модель определения эффективного коэффициента концентрации напряжений дефектов сварных швов. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2012, № 1, с. 169–176.
- [2] Пряхин Е.И., Шаронов Н.И. Основные положения и проблемы технологии ЭЛС применительно к изготовлению конструкций из алюминий-магниево-литиевых сплавов. *Записки Горного института*, 2018, т. 174, с. 84–91.
- [3] Патон Б.Е., ред. *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова Думка, 1987. 255 с.
- [4] Неровный В.М., ред. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 702 с.
- [5] Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В., Прохоров П.В. Металлографические исследования сварных швов алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li, подвергнутого термовакуумной обработке. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2020, № 1, с. 40–53.
- [6] Уланов М.А., Платонов О.А. Особенности технологии электронно-лучевой сварки в ракетостроении. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. мат. VIII межд. науч.-практ. конф.* Т. 1. Красноярск, СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2022, с. 154–157.
- [7] Чукин Г.Д. *Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций*. Москва, Типография Паладин, ООО Принта, 2010. 288 с.
- [8] Lan N., Teruo H., Zakharov D.N. Atomic-scale insights into the oxidation of aluminum. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 2230–2235, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b17224>
- [9] Махсудова М.С., Ганиев И.Н., Норова М.Т. и др. Кинетика окисления твердых сплавов системы Al-Mg-Sa. *Доклады Академии наук республики Таджикистан*, 2007, т. 50, № 7, с. 613–617.

- [10] Овчинников В.В., Лопаткин А.И. *Современные технологии сварки плавлением алюминиевых сплавов*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2020. 372 с.
- [11] Davis J.R. *Aluminum and aluminum alloys*. ASM, 1993. 784 p.
- [12] Ямпольский А.М. *Травление металлов*. Москва, Металлургия, 1980. 168 с.
- [13] Ашхотов О.Г., Ашхотова И.Б., Крымшохалова Д.А. Окисление поликристаллического алюминия в сверхвысоком вакууме. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки*, 2014, № 2, с. 32–34.
- [14] Каракозов Э.С., Харламов Б.А., Равич А.М. и др. Механизм образования соединения между сплавом АМц и корундовой керамикой при диффузионной сварке. *Сварочное производство*, 1987, № 12, с. 33–36.
- [15] Мусин Р.А., Конюшков Г.В. *Соединение металлов с керамическими материалами*. Москва, Машиностроение, 1991. 222 с.

## References

- [1] Mironov A.A. A model for determining the fatigue-strength reduction factor of defects in welds joints. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2012, no. 1, pp. 169–176. (In Russ.).
- [2] Pryakhin E.I., Sharonov N.I. Development of the traction electric drive of the trolley transportation for the open-cast mining works. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2018, vol. 174, pp. 84–91. (In Russ.).
- [3] Paton V.E., ed. *Elektronno-luchevaya svarka* [Electron-beam welding]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 255 p. (In Russ.).
- [4] Nerovnyy V.M., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016. 702 p. (In Russ.).
- [5] Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V., Prokhorov P.V. Metallographic investigations of welded joints of aluminium alloy of Al-Mg-Li system, subjected to thermal vacuum treatment. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2020, no. 1, pp. 40–53. (In Russ.).
- [6] Ulanov M.A., Platonov O.A. [Features of electron beam welding technology in rocket engineering]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Sb. mat. VIII mezhd. nauch.-prakt. konf. T. 1* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. akademika M.F. Reshetneva Publ., 2022, pp. 154–157. (In Russ.).
- [7] Chukin G.D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsiy* [Structure of aluminum oxide and hydrodesulfurization catalysts. Mechanisms of reactions]. Moscow, Tipografiya Paladin Publ., OOO Printa Publ., 2010. 288 p. (In Russ.).
- [8] Lan N., Teruo H., Zakharov D.N. Atomic-scale insights into the oxidation of aluminum. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 2230–2235, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b17224>
- [9] Makhsudova M.S., Ganiev I.N., Norova M.T. et al. Kinetik of oxydation of solid allows of Al-Mg-Ca system. *Doklady Akademii nauk respubliki Tadzhikistan*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 613–617. (In Russ.).
- [10] Ovchinnikov V.V., Lopatkin A.I. *Sovremennyye tekhnologii svarki plavlением alyuminiyevykh splavov* [Modern technologies of fusion welding for aluminum alloys]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 372 p. (In Russ.).
- [11] Davis J.R. *Aluminum and aluminum alloys*. ASM, 1993. 784 p.
- [12] Yampolskiy A.M. *Travlenie metallov* [Metal etching]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 168 p. (In Russ.).
- [13] Ashkhotov O.G., Ashkhotova I.B., Krymshokalova D.A. Oxidation of polycrystalline aluminium in ultrahigh vacuum. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Ser. Estestvennyye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences], 2014, no. 2, pp. 32–34. (In Russ.).
- [14] Karakozov E.S., Kharlamov B.A., Ravich A.M. et al. Mechanism of joint formation between AMz alloy and corundum ceramics at diffusion welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1987, no. 12, pp. 33–36. (In Russ.).

- [15] Musin R.A., Konyushkov G.V. *Soedinenie metallov s keramicheskimi materialami* [Connection of metals with ceramic materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 222 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.03.2025

## Информация об авторе

**ЗИМАКОВ Артем Евгеньевич** — аспирант кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: artemezim@mail.ru).

## Information about the author

**ZIMAKOV Artem Evgenyevich** — Postgraduate, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: artemezim@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зимаков А.Е. Влияние технологических параметров на качество сварного соединения при электронно-лучевой сварке микрошвов алюминиевых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 77–83.

### Please cite this article in English as:

Zimakov A.E. Technological parameters influence on the welded joint quality in electron beam welding of the aluminum alloy micro-seams. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 77–83.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Многомасштабное моделирование упругопластических композиционных материалов»

Авторы: Ю.И. Димитриенко, Ю.В. Юрин,  
С.В. Сборщиков

Изложены основы многомасштабного моделирования упругопластических композиционных материалов с использованием метода асимптотического осреднения (метода гомогенизации). Приведен алгоритм метода асимптотического осреднения периодических упругопластических композиционных материалов при циклических нагружениях. Рассмотрена теория построения аналитических эффективных определяющих соотношений упругопластических композиционных материалов при циклических нагружениях с использованием метода асимптотического осреднения. Предложены теории анизотропных упругопластических сред при циклических нагружениях для случая квазиизотропии, трансверсальной изотропии и ортотропии.

Для студентов направления подготовки «Математика и компьютерные науки», изучающих дисциплины «Основы механики композитов», «Асимптотические методы в механике», «Многомасштабное моделирование конструкций из композиционных материалов», а также для студентов и аспирантов машиностроительных специальностей и специалистов, занимающихся моделированием композиционных материалов и расчетом конструкций из них.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>