

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА  
ЛАЗЕРНОГО СВАРНОГО ШВА АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ  
СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ Mg и Cu\***

Карпов Е.В.<sup>1,2</sup>, Маликов А.Г.<sup>2</sup>, Оришич А.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

**АННОТАЦИЯ**

Проведены комплексные экспериментальные исследования деформирования и разрушения лазерных сварных швов современных авиационных алюминийлитиевых сплавов, легированных Mg и Cu. Исследовано влияние механической и термической обработки сварных соединений на структуру, прочность и деформативность шва, а также влияние температуры в пределах эксплуатационного диапазона (от -60 до +85°C) на разрушение исходного и обработанного шва и его механические характеристики при статическом и малоцикловом растяжении. Для сплава 1420 определены границы возможного упрочнения шва статическим прессованием. Показана, что для сплавов, содержащих Cu, обработка шва прессованием не дает результатов, и что при повышении температуры возрастает неоднородность деформирования необработанного сварного шва. Это приводит к уменьшению предела прочности и предельной деформации сварных соединений, а также увеличивает их чувствительность к накоплению повреждений при малоцикловом нагружении. Исследовано влияние закалки на микроструктуру и механические свойства сплава В-1461. Для него определен режим термообработки сварных соединений, при котором предельная нагрузка достигает 96%, а предельная деформация – 150% от соответствующих характеристик исходного сплава.

**Ключевые слова:** лазерная сварка; алюминийлитиевые сплавы; термообработка; повышение прочности сварных соединений; разрушение; структура сварного шва

**THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT  
ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES  
OF THE LASER WELDED SEAM OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS  
CONTAINING Mg AND Cu**

Karpov E.V.<sup>1,2</sup>, Malikov A.G.<sup>2</sup>, Orishich A.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №17-79-20139.

## ABSTRACT

Complex experimental studies of the deformation and destruction of laser welds of modern aviation aluminum-lithium alloys doped with Mg and Cu have been carried out. The influence of mechanical and heat treatment of welded joints on the structure, strength and deformability of the weld, as well as the effect of temperature within the operating range (from -60 to +85°C) on the destruction of the original and treated weld and its mechanical characteristics under static and low-cycle stretching, is investigated. The boundaries of the possible hardening of the seam by static pressing were determined for alloy 1420. It has been shown that, for alloys containing Cu, the pressing of a weld does not give results, and that with an increase in temperature, the non-uniformity of deformation of the untreated weld increases. This leads to a decrease in the ultimate strength and ultimate deformation of welded joints, and also increases their sensitivity to damage accumulation under low-cycle loading. The effect of quenching on the microstructure and mechanical properties of alloy B-1461 has been investigated. For it, the heat treatment mode of welded joints is determined, at which the ultimate load reaches 96%, and the ultimate deformation – 150% of the corresponding characteristics of the original alloy.

**Keywords:** laser welding; aluminum-lithium alloys; heat treatment; increasing the strength of welded joints; fracture; weld structure

## ВВЕДЕНИЕ

При создании авиационно-космической техники применяются современные высокопрочные Al-Li сплавы, имеющие пониженную плотность по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами за счет применения Li [1-3]. В настоящее время созданы новые высокопрочные термически упрочняемые, деформируемые сплавы различных систем, например: Al-Mg-Li-X (X = Zn, Mn, Zr, Sc), Al-Cu-Mg-Li, Al-Cu-Li-X (X =Mg, Zn, Mn, Zr, Sc), а также разрабатываются технологии сварки данных сплавов с целью перехода в авиастроении от традиционных заклепочных соединений к сварным, что позволит уменьшить вес самолетов на 15-20% и сделать процесс изготовления существенно более простым и технологичным. Перспективным способом создания неразъемных соединений является лазерная сварка, имеющая ряд преимуществ перед дуговой, таких как высокая точность, глубокое проникновение луча в материал за счет высокой плотности энергии, малые размеры шва и ЗТВ, низкая теплоотдача, возможность автоматизации процесса. Однако прочность сварных швов, получаемых плавлением, для сплавов такого типа по различным причинам составляет от 0,55 до 0,8 прочности исходного материала даже если оптимизацией режима сварки и использованием присадок удастся добиться отсутствия газовых пор и горячих трещин и компенсировать выгорание легких легирующих элементов в сварном шве [4-7]. В связи с этим существует актуальная проблема создания методов постобработки лазерных сварных швов алюминийлитиевых сплавов, которые могли бы приблизить механические свойства шва к характеристикам исходного сплава. В рамках разработки метода создания прочных лазерных сварных соединений алюминийлитиевых сплавов были проведены комплексные экспериментальные исследования деформирования и разрушения лазерных сварных швов сплавов систем Al-Mg-Li (сверхлегкие), Al-Mg-Cu-Li (среднепрочные), Al-Cu-Li (высокопрочные). Исследовано влияние механической и термической обработки сварных соединений на структуру, прочность и деформативность шва, а также

влияние температуры в пределах эксплуатационного диапазона (от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ ) на разрушение исходного и обработанного шва и его механические характеристики при статическом и малоцикловом растяжении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одной из причин снижения прочности сварных швов алюминийлитиевых сплавов, легированных Mg и Cu, является то, что при кристаллизации из расплава в сварочной ванне образуются выделения, собирающие на себя легирующие элементы, обедняя твердый раствор вокруг них. У сплавов Al-Mg-Li они расположены хаотически и достаточно равномерно, а у сплавов Al-Cu-Li образуют выраженные крупноячеистые дендритные структуры, так что сплав превращается в композит, состоящий из обедненного твердого раствора, и каркаса из протяженных ветвей дендритов, перенасыщенных легирующими элементами (см. рис.1).

Из-за этих дендритных структур сварные швы сплавов Al-Cu-Li имеют гораздо меньшую относительную прочность шва, чем швы сплавов с Mg, хотя у последних швы содержат большое количество газовых пузырей, почти отсутствующих в шве сплавов с Cu.

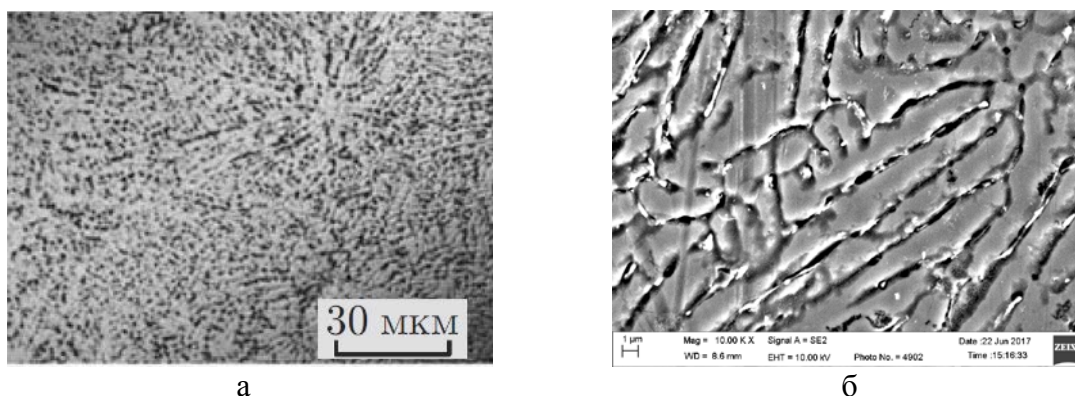


Рис.1. Микроструктура лазерного сварного шва: (а) – сплава 1420 (Al-Mg-Li), (б) – сплава 1461 (Al-Cu-Li).

Исследования влияния пластического прессования зоны сварного шва на прочность и деформативность сварных соединений показали, что у сплавов системы Al-Mg-Li одной из причин низкой прочности является образование неподвижных локализаций пластической деформации в шве, появление которых обнаруживается по специфической прерывистой текучести, отличной от прерывистой текучести, свойственной исходным сплавам этой системы. Предварительное пластическое прессование шва приводит к подавлению очагов прерывистой текучести в нем, в результате чего удается повысить предел текучести, предел прочности и предельную деформацию сварного соединения. В частности, предел прочности повышается на 65% от прочности необработанного шва и достигает 0,93 предела прочности исходного сплава. Исследование микроструктуры показало, что выделения, содержащие избыток легирующих элементов, при такой обработке образуют протяженные цепочки, ориентированные в направлении, нормальном к направлению приложения нагрузки при прессовании. Обработка пластическим прессованием сварных швов сплавов системы Al-Cu-Li не дала практически никаких результатов.

Были проведены исследования деформирования и разрушения сварных швов сплавов систем Al-Mg-Li, Al-Mg-Cu-Li, Al-Cu-Li при температурах  $-60$ ,  $+20$  и  $+85^{\circ}\text{C}$ , где  $-60^{\circ}\text{C}$  соответствует большим высотам и условиям крайнего Севера, а  $+85^{\circ}\text{C}$  – температура, выше которой начинаются фазовые изменения. Было обнаружено, что для сплава 1424 (Al-Mg-Li) как нагрев, так и охлаждение подавляют процессы прерывистой текучести как в шве, так и в основном сплаве, в результате чего увеличивается деформируемость сварного соединения. У сплава 1461 (Al-Cu-Li), которому прерывистая текучесть не свойственна, однородность деформирования шва сохраняется только при отрицательной температуре, а при ее повышении возрастает неоднородность необратимого деформирования (см. рис.2), в результате чего уменьшается как прочность, так и предельная деформация сварного соединения. Сплав системы Al-Cu-Mg-Li обладает отчасти свойствами сплава Al-Mg-Li, но из-за наличия в его сварных швах дендритной структуры, подобной наблюдаемым у сплавов Al-Cu-Li, он в основном демонстрирует то же поведение, что сплавы Al-Cu-Li, в частности, прочность и деформативность сварного шва снижается при увеличении температуры из-за увеличения неоднородности деформирования.

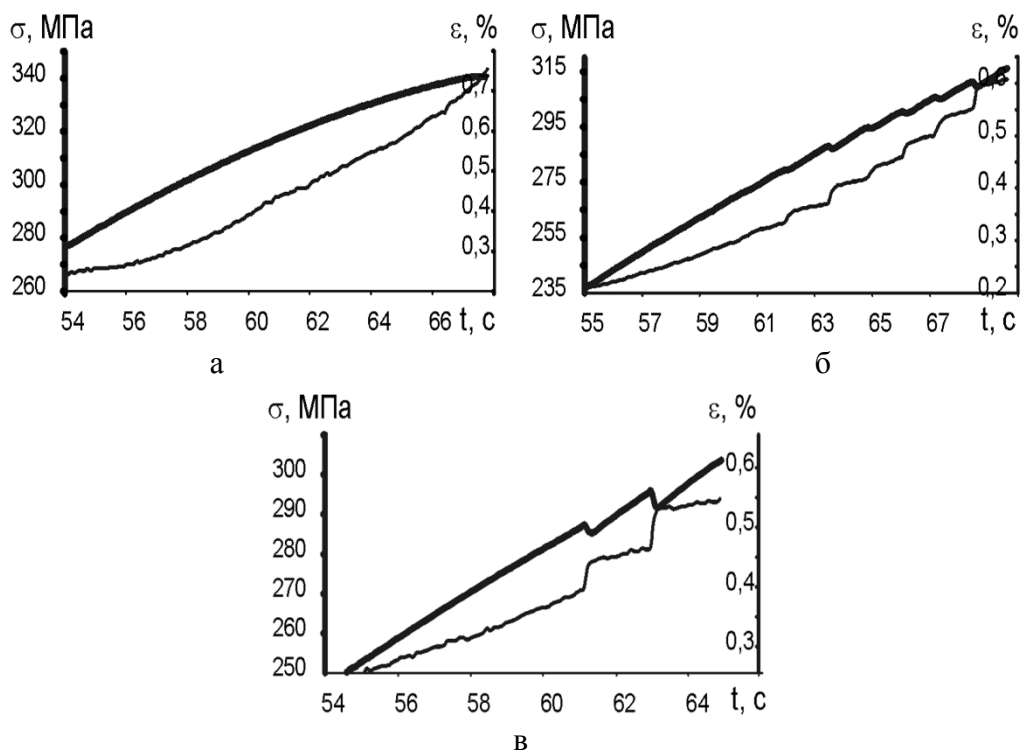


Рис.2. Увеличение неоднородности необратимого деформирования сварного шва сплава 1461 при увеличении температуры: (а) –  $T = -60^{\circ}\text{C}$ , (б) –  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , (в) –  $T = 85^{\circ}\text{C}$ .

Поскольку основной причиной низкой прочности сварных швов алюминийлитиевых сплавов, легированных медью, является крупночешуйчатая дендритная структура шва, было предпринято исследование, направленное на оптимизацию термической обработки сварных соединений, первая стадия которой (закалка) необходима для растворения дендритных структур шва, а вторая (искусственное старение) – для восстановления прочности основного сплава. Последнее необходимо из-за того, что закалке подвергается не только

область шва и зона термического влияния, но и основной сплав, который при этом теряет прочность, полученную в процессе изготовления благодаря многоступенчатой термической обработке.

Было проведено исследование влияния закалки при различных температурах на микроструктуру, прочность, деформативность и характер необратимого деформирования сварного соединения, включающего шов и основной сплав (см. рис.3). В результате этого исследования были определены границы возможного увеличения прочности сварного соединения при закалке и определен ее оптимальный режим, при котором достигается максимальная прочность, разрушение происходит не по сварному шву. После этого был определен оптимальный режим искусственного старения для восстановления прочности основного сплава.

Для сварных соединений сплава 1461, подвергнутых термообработке в оптимизированном режиме было экспериментально исследовано влияние температуры в диапазоне от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  на разрушение шва при статическом и малоцикловом нагружении, в результате которых было установлено, что в результате термообработки был устранен эффект отрицательного влияния повышения температуры в рабочем диапазоне на прочность и предельную деформацию шва. Также было установлено, что наименьшей чувствительностью к усталостному разрушению сварной шов обладает при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , а при нагреве и охлаждении повреждаемость при многократном нагружении возрастает из-за активизации дополнительных механизмов накопления повреждений.

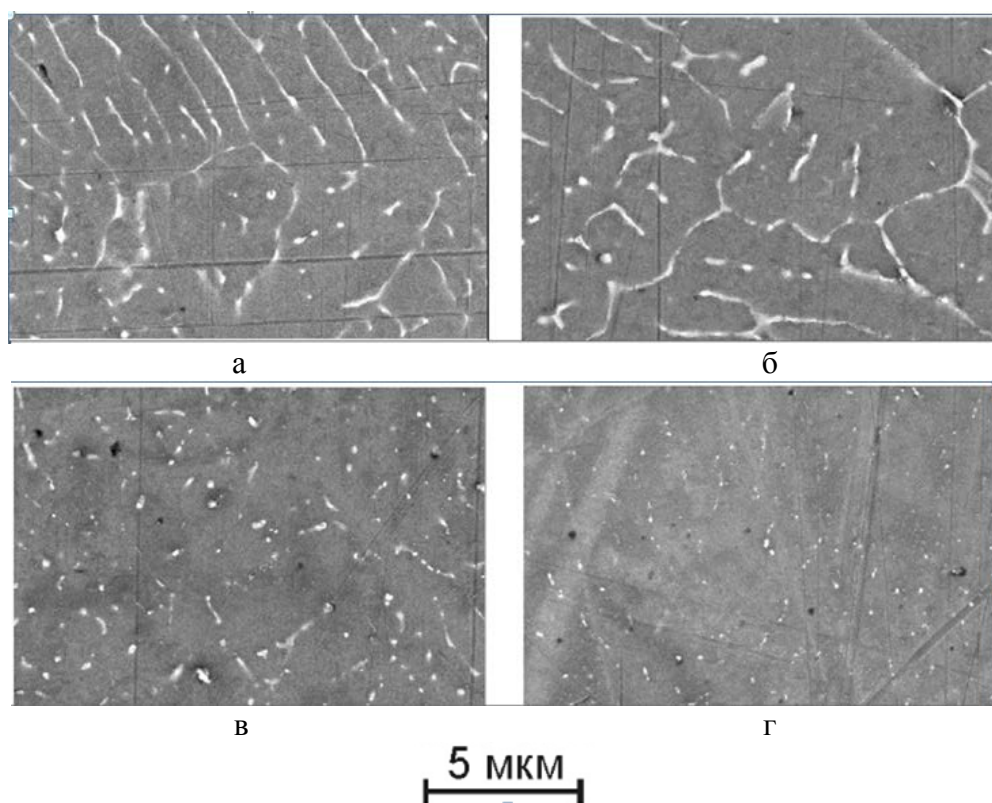


Рис.3. Микроструктуры сварного шва: (а) – в исходном состоянии, (б) – после закалки при  $T=400^{\circ}\text{C}$ , (в) – после закалки при  $T=475^{\circ}\text{C}$ , (г) – после закалки при  $T=530^{\circ}\text{C}$ .

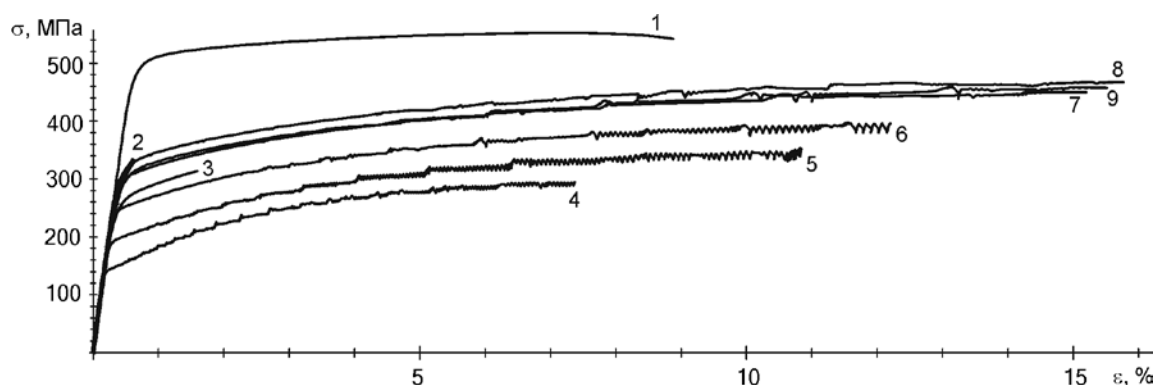


Рис.4. Диаграммы нагружения сплава 1461 и сварных деталей, влияние закалки: 1 – сплав, 2 – исходный сварной шов, 3 – шов после закалки (30 минут при  $T=320^{\circ}\text{C}$ , охлаждение в воде), 4 – то же при  $T=400^{\circ}\text{C}$ , 5 –  $T=450^{\circ}\text{C}$ , 6 –  $T=475^{\circ}\text{C}$ , 7 –  $T=500^{\circ}\text{C}$ , 8 –  $T=530^{\circ}\text{C}$ , 9 –  $T=545^{\circ}\text{C}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были установлены некоторые структурные причины низкой исходной прочности лазерных сварных швов алюминийлитиевых сплавов, легированных Mg и Cu и связанные с ними возможные способы увеличения прочности и деформативности лазерных сварных соединений этих сплавов. Для сплава В-1461 системы Al-Cu-Li определен режим термообработки сварных соединений, при котором предельная нагрузка достигает 96%, а предельная деформация – 150% от соответствующих характеристик исходного сплава.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – №S. – С.183–195.
2. Williams J.C., Starke E.A. *Progress in structural materials for aerospace systems* // *Acta Mater.* – 2003. – Vol.51. – Pp.5775-5799.
3. Rioja R.J., Liu J. *The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications* // *Metall. Mater. Trans.* – 2012. – Vol.43. – Pp.3325-3337.
4. Дитрих Д., Бренер Б. *Применение технологий лазерной сварки при изготовлении интегральных конструкций обшивки фюзеляжа гражданских крупногабаритных самолетов* // *Авиационная промышленность*. – 2011. – №1. – С.1-7.
5. Rongshi Xiao, Xinyi Zhang. *Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys* // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol.16. – Pp.166-175.
6. Аннин Б.Д., Фомин В.М., Антипов В.В. и др. *Исследование технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424* // *Докл. АН*. – 2015. – Т.465. – №4. – С.419-424.
7. Аннин Б.Д., Фомин В.М., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М. *Влияние Mg и Cu на механические свойства высокопрочных лазерных сварных швов алюминиевых сплавов* // *ПМТФ*. – 2017. – Т.58. – №5. – С.208-217.

## REFERENCES

1. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. *Razvitie alyuminijlitievykh splavov i mnogostupenchatykh rezhimov termicheskoy obrabotki [The development of aluminum-lithium alloys and multi-stage heat treatment]*. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, No.S, Pp.183-195.
2. Williams J.C., Starke E.A. *Progress in structural materials for aerospace systems*. *Acta Mater.*, 2003, Vol.51, Pp.5775-5799.
3. Rioja R.J., Liu J. *The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications*. *Metall. Mater. Trans.*, 2012, Vol.43, Pp.3325-3337.
4. Ditrh D., Brener B. *Primenenie tekhnologij lazernoj svarki pri izgotovlenii integral'nykh konstruksij obshivki fyuzelyazha grazhdanskikh krupnogabaritnykh samoletov [The use of laser welding technologies in the manufacture of integrated structures for the fuselage skin of large civil aircraft]*. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2011, No.1, Pp.1-7.
5. Rongshi Xiao, Xinyi Zhang. *Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys*. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, Vol.16, Pp.166-175.
6. Annin B.D., Fomin V.M., Antipov V.V. et.al. *Issledovanie tekhnologii lazernoj svarki alyuminievogo splava 1424 [The study of laser welding technology of aluminum alloy 1424]*. *Doklady akademii nauk*, 2015, Vol.465, No.4, Pp.419-424.
7. Annin B.D., Karpov E.V., Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M. *Effect of Mg and Cu on mechanical properties of high-strength welded joints of aluminum alloys obtained by laser welding*. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, Vol.58, No.5, Pp.939-946.

Поступила в редакцию 17 сентября 2019 года.

---

### Сведения об авторах:

Карпов Евгений Викторович – д.ф.-м.н., проф., в.н.с., ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: [evkarpov@mail.ru](mailto:evkarpov@mail.ru)

Маликов Александр Геннадьевич – к.ф.-м.н., с.н.с., зав.лаб., ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: [smalik@ngs.ru](mailto:smalik@ngs.ru)

Оришич Анатолий Митрофанович – д.ф.-м.н., проф., г.н.с., ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: [orishich@itam.nsc.ru](mailto:orishich@itam.nsc.ru)