

УДК 62-932

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-22-28

Н.А. Сапрыкина, А.А. Сапрыкин, Ю.П. Шаркеев, Е.А. Ибрагимов, М.А. Химич

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОРИСТОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОРОШКОВ КОБАЛЬТА, ХРОМА И МОЛИБДЕНА

Найдено широкое применение высокопрочного, коррозионностойкого кобальт-хром-молибденового сплава в машиностроении для изготовления изделий, используемых для работы в агрессивных средах. Определены оптимальные параметры режима селективного лазерного плавления

для получения образцов из порошковых материалов 66 мас. % Co, 28 мас. % Cr, 6 мас. % Mo с минимальной пористостью.

Ключевые слова: лазерное плавление, порошковый материал, сплав, режимы, пористость, аддитивные технологии.

N.A. Saprykina, A.A. Saprykin, Yu.P. Sharkeev, E.A. Ibragimov, M.A. Khimich

MODE INFLUENCE OF SELECTIVE LASER IMPACT UPON POROSITY OF SAMPLES OF COBALT, CHROMIUM AND MOLYBDENUM POWDERS

The purpose of this investigation consists in the analysis of possibility to obtain products by means of the SLP method using powders of cobalt, chromium and molybdenum having considerable difference in melting temperatures of cobalt (1768°C), chromium (2130°C) and molybdenum (2890°C), density, thermal conduction and solving for the optimum technological modes of powder composition melting to obtain samples with lower porosity.

The investigation methods include methods of physical material science.

Investigation results and novelty: a procedure for obtaining a powder composite of the cobalt-chromium-molybdenum system for selective laser melting is developed. There are carried out experimental investigations on the selection of optimum technological modes for the layer-by-layer laser melting of a cobalt-chromium-molybdenum alloy of powder composition. A method for layer-by-layer laser synthesis for the solution of a principle matter – possibility for the synthesis of the products of cobalt chromium and molybdenum powders having a considerable

difference in melting temperatures, density, heat conductivity and so on.

The investigations of model alloy samples of cobalt-chromium-molybdenum system obtained through the method of layer-by-layer laser synthesis on optimized technological modes through the methods of scanning electronic microscopy allow defining sample porosity.

The generalization of obtained numerical and experimental investigation results and definition of essential conditions for selective laser melting allow optimizing modes and parameters of the synthesis.

Conclusions: the optimum modes of selective laser melting for obtaining the samples with the powder composition of 66 mas. % Co, 28 mas. % Cr, 6 mas.% Mo through the method of selective laser melting with minimum porosity are: laser capacity $P=100\text{Wt}$, scanning rate $v=350\text{mm/s}$, modulation 5000Hz, scanning pitch $s=0.1\text{mm}$, layer thickness $h=0.03\text{mm}$, melting process takes place in protective argon environment.

Key words: laser melting, powder material, alloy, modes, porosity, additive technologies.

Введение

Кобальт-хром-молибденовый сплав является незаменимым материалом для применения в машиностроении и биомедицине [1]. В основном это объясняется его превосходными характеристиками по коррозионной стойкости, износостойкости, термостойкости, высокой устойчивости к ползучести и хорошей биосовместимости [2]. В машиностроении из кобальт-хром-молибденового сплава чаще всего изготавливают элементы двигателей внутреннего сгорания и турбин.

Присутствие молибдена в составе кобальтовых сплавов улучшает механические свойства этих сплавов [3]. Частицы хрома образуют защитный оксидный слой на поверхности, что обеспечивает коррозионную стойкость. Поскольку этот сплав сохраняет свою прочность и твердость при повышенных температурах, является износостойким, имеет низкую теплопроводность, он относится к труднообрабатываемым материалам. При механиче-

ской обработке из-за высокой твердости сплава увеличивается сопротивление деформации, что приводит к увеличению силы резания. Как правило, обработка материалов высокой твердости, приводит к снижению стойкости режущего инструмента и получению поверхности плохого качества. Это является проблемой при изготовлении сложнопрофильных деталей с помощью механической обработки. Технологии аддитивного производства, в частности метод селективного лазерного плавления (СЛП) позволяет послойно изготавливать детали любой геометрической сложности на основе 3D-модели, которые трудно или даже невозможно изготовить традиционными способами [4]. Например, форсунки для впрыска топлива в космических аппаратах часто имеют сложную конструкцию, которые сегодня производятся именно аддитивными технологиями, а ранее изготавливались путем сборки нескольких компонентов [5, 6]. Сплав кобальт-хром-молибдена, получаемый традиционными способами хорошо изучен отечественными и зарубежными учеными. Применение метода селективного лазерного плавления, при котором под воздей-

ствием лазера можно получить уникальную структуру, сильно отличающуюся от структуры сплава, полученного традиционными способами, требует дополнительных исследований [7, 8]. Повышения износостойкости и твердости детали можно достичь увеличением альфа-мартенситной фазы в сплаве в результате кратковременного локального воздействия лазера и быстрого охлаждения расплавленного материала. Анализ литературных источников показал, что в основном работы направлены на определение условий лазерного плавления для получения образцов из порошка сплава CoCrMo на промышленном коммерческом оборудовании. Целью данного исследования является изучение возможности получения изделий методом СЛП из порошков кобальта, хрома и молибдена, имеющих значительное различие в температурах плавления кобальта (1768 °С), хрома (2130 °С) и молибдена (2890 °С), плотности, теплопроводности и нахождение оптимальных технологических режимов плавления порошковой композиции для получения образцов с меньшей пористости.

Проведение поисковых экспериментов

Исследования проведены на экспериментальной установке СЛП «ВАРИСКАФ-100МВС». Основными компонентами установки СЛП являются лазер, устройство подачи порошка, компьютерная система управления, устройство подогрева, вакуумная камера. Установка имеет рабочую зону 100×100×100 мм, сканирующую оптику, иттербиевый волоконный лазер с максимальной мощностью 100 Вт, есть возможность подогрева рабочей зоны до 400 °С, нанесение слоя порошка – бункерное, процесс осуществляется в защитной атмосфере аргона. Для формирования образцов изготовлена подложка из титана марки ВТ1-0. Для снижения термических напряжения подложка предварительно нагревается до температуры 190-200 °С [9, 10].

В качестве исходных материалов был взят порошок в следующей пропорции: 66 мас. % кобальта, 28 мас. % хрома и 6

мас. % молибдена. С помощью ситового анализа были отобраны порошки с размером частиц 20-70 мкм. Затем их поместили в одну емкость и подвергли механическому перемешиванию в течении 15 мин [11].

С целью нахождения режима для получения образцов с минимальной пористостью проведены поисковые эксперименты, в которых скорость сканирования лазера изменялась в диапазоне 50-90 мм/с и 325-400 мм/с, мощность лазерного излучения 100 Вт, шаг сканирования 50 и 100 мкм, толщина слоя порошка постоянна 30 мкм, выбран импульсный режим лазера, модуляция 5000 Гц. При постоянном режиме работы лазера срабатывала аварийная защита на блоке лазера не зависимо от скорости сканирования. При шаге сканирования 50 мкм после сплавления 3-4 слоев наблюдалось очень сильное коробление образцов, поэтому для дальнейших исследований принимаем 100 мкм.

Стратегия формирования единичного слоя построена с шириной области 2,5 мм с направлением сканирования взаимоперпендикулярно от слоя к слою. Такая стратегия с разбиением областей сканирования позволяет снизить остаточные напряжения при сплавлении порошковых материалов с высокой температурой плавления, рис. 1.

На установке СЛП под воздействием лазерного излучения изготовлены образцы квадратного сечения со стороной 10 мм состоящие из 15 слоев. Образцы, полученные на низких скоростях сканирования 50-90 мм/с, подвержены значительному короблению, на поверхности видны глубокие трещины, значительно превосходящие толщину слоя порошка, для дальнейших исследований данный диапазон скоростей не применяем. При увеличении скорости сканирования до 325-400 мм/с на поверх-

ности образца трещины отсутствовали. Принято решение провести эксперименты со значениями скоростей 325, 350, 400, 450 мм/с

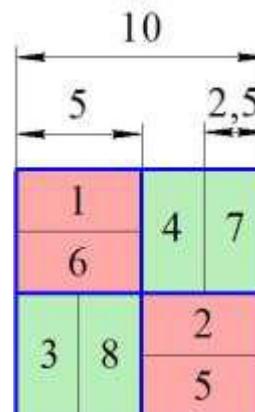


Рис. 1. Стратегия формирования единичного слоя

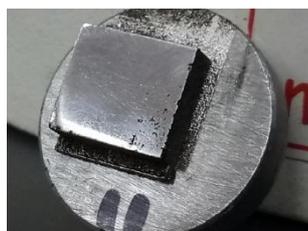
Экспериментальные исследования

На основе поисковых экспериментов была проведена оптимизация параметров селективного лазерного плавления для формирования малопористых образцов. Получена панель объемных образцов, которая позволяет анализировать изменение

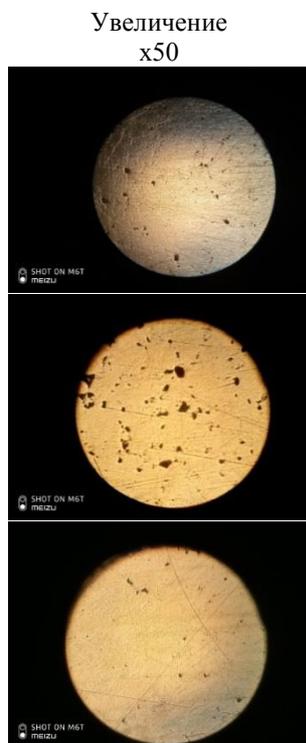
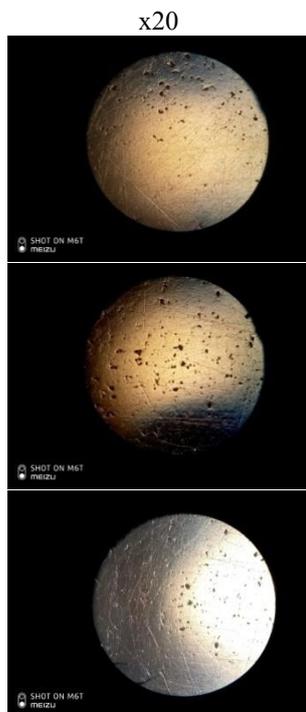
пористости в зависимости от скорости сканирования.

Оптическая микросъемка производилась на трех разных участках для каждого образца, рис. 2.

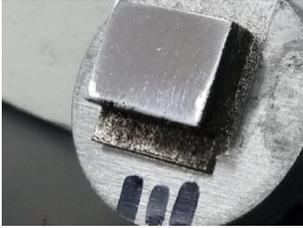
Образец № 1



$P = 100 \text{ Вт}$
 $v = 325 \text{ мм/с}$
 $m = 5000 \text{ Гц}$
 $s = 0,1 \text{ мм}$
 $h = 0,03 \text{ мм}$



Образец № 2



$P = 100 \text{ Вт}$
 $v = 350 \text{ мм/с}$
 $m = 5000 \text{ Гц}$
 $s = 0,1 \text{ мм}$
 $h = 0,03 \text{ мм}$

x20



Увеличение
x50



x200



Образец № 3



$P = 100 \text{ Вт}$
 $v = 400 \text{ мм/с}$
 $m = 5000 \text{ Гц}$
 $s = 0,1 \text{ мм}$
 $h = 0,03 \text{ мм}$

x20



Увеличение
x50



x200



Образец № 4



x20



Увеличение
x50



x200



$P = 100\text{Вт}$
 $v = 450\text{ мм/с}$
 $m = 5000\text{ Гц}$
 $s = 0,1\text{ мм}$
 $h = 0,03\text{ мм}$

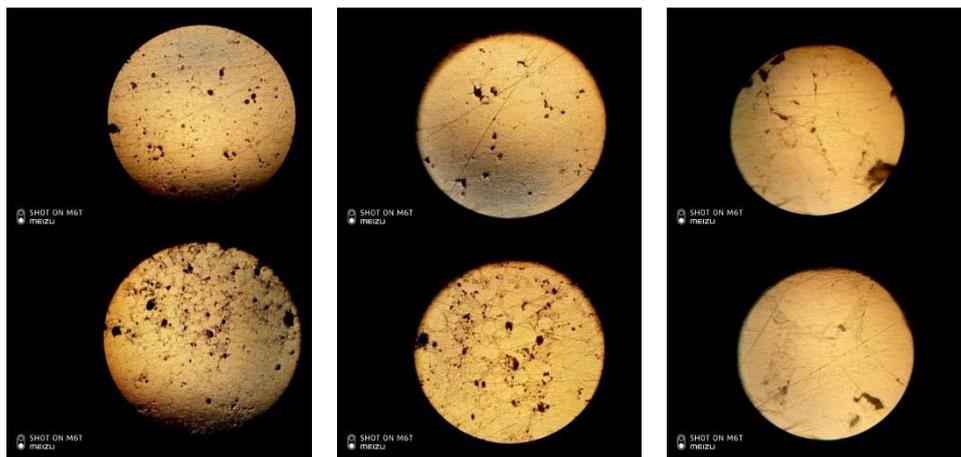


Рис. 2. Фотографии структуры образцов, полученных методом СЛП

Пористость измерена по оптическим изображениям, снятым со шлифов поверхностей полученных образцов. На графике, построенном по полученным значениям пористости в зависимости от скорости сканирования, рис. 3 видно, что с увеличением скорости сканирования объемная пористость уменьшается нелинейно. Ее минимальное значение 2 % достигается при скорости сканирования 450 мм/с.

Однако, при увеличении скорости сканирования выше 350 мм/с на оптических изображениях шлифов поверхности полученных образцов отчетливо видны «непроплавы». Это связано с уменьшением удельной тепловой энергии при увеличении скорости сканирования, что приводит к частичному переплаву порошка. Поэтому оптимальной скоростью сканирова-

ния для получения образцов с объемной плотностью 97,8 % является скорость 350 мм/с.

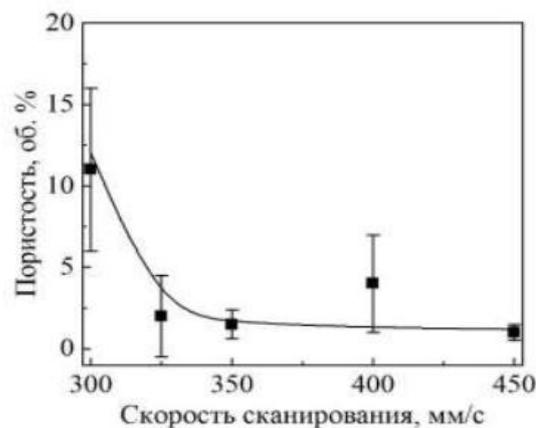


Рис. 3. Влияние скорости сканирования на пористость, формируемую в объемных образцах

Заключение

В данной статье описана возможность получения сплава из композиции порошков 66 мас. % Co, 28 мас. % Cr, 6 мас. % Mo методом селективного лазерного плавления. Описаны результаты поисковых экспериментов. Найдены оптимальные режимы СЛП для получения образцов

с минимальной пористостью: мощность лазера $P = 100\text{ Вт}$, скорость сканирования $v = 350\text{ мм/с}$, модуляция 5000 Гц, шаг сканирования $s = 0,1\text{ мм}$, толщина слоя $h = 0,03\text{ мм}$, процесс плавления осуществляется в защитной атмосфере аргона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта №19-48-700022 р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Xin, Z.** Surface properties and corrosion behavior of Co-Cr alloy fabricated with selective laser melting technique / Z. Xin, J. Chen, N. Xiang, B. Wei // Cell Biochem Biophys. – 2013. - Vol. 67. - Pp. 983–990.
2. **Wu, L.** Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strength of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting / L. Wu, H. Zhu, X. Gai, Y. Wang // J Prosthet Dent. - 2014. - Vol.111. - Pp. 51–55.

3. **Li, H.** Powder bed fusion to aging heat treatment / H. Li, M. Wang, D. Lou, W. Xia // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Vol. 45. – Pp. 146–156.
4. **Attar, H.** Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti-TiB composite materials manufactured by selective laser melting / H. Attar, L. Löber, A. Funk, M. Calin, L. C. Zhang, K. G. Prashanth, S. Scudino, Y. S. Zhang, J. Eckert // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2015. – Vol. 625. – Pp. 350–356.
5. **Huang S. H.** Additive manufacturing and its societal impact: a literature review / S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2013. – Vol.67. – Pp. 1191–1203.
6. **Gokuldoss P. K.** Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines / P. K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert // *Mater.* – 2017. – Vol.10. – P. 672.
7. **Sharkeev, Yu. P.** Structural and Phase State of Ti-Nb Alloy at Selective Laser Melting of the Composite Powder / Yu. P. Sharkeev, A. Yu. Eroshenko, Zh. G. Kovalevskaya, A. A. Saprykin, E. A. Ibragimov, I. A. Glukhov, M. A. Khimich, P. V. Uvarkin, E. V. Babakova // *Russian Physics Journal*. – 2016. – Vol.59(3). – Pp. 430–434.
8. **Sharkeev, Y. P.** Selective laser melting of the Ti-(40–50) wt.% Nb alloy / Y. P. Sharkeev, A. I. Dmitriev, A. G. Knyazeva, A. Yu. Eroshenko, A. A. Saprykin, M. A. Khimich, E. A. Ibragimov, I. A. Glukhov, A. M. Mairambekova, A. Y. Nikonov // *High Temperature Material Processes*. – 2017. – Vol.21 (2). – Pp. 161–183.
9. **Saprykin, A. A.** Surface formation mechanisms in selective laser melting of cobalt-chromium-molybdenum powder / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, E. A. Ibragimov // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol.839. – Pp. 73–78.
10. **Saprykin, A. A.** The mechanism of forming coagulated particles in selective laser melting of cobalt-chromium-molybdenum powder / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, E. A. Ibragimov // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol.839. – Pp. 79–85.
11. **Saprykin, A. A.** Formation of structural-phase state in a cobalt-chromium-molybdenum alloy by selective laser melting / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, M. A. Khimich, E. A. Ibragimov // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol.313. – Pp. 50–58.
1. **Xin, Z.** Surface properties and corrosion behavior of Co-Cr alloy fabricated with selective laser melting technique / Z. Xin, J. Chen, N. Xiang, B. Wei // *Cell Biochem Biophys*. – 2013. – Vol. 67. – Pp. 983–990.
2. **Wu, L.** Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strength of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting / L. Wu, H. Zhu, X. Gai, Y. Wang // *J Prosthet Dent*. – 2014. – Vol.111. – Pp. 51–55.
3. **Li, H.** Powder bed fusion to aging heat treatment / H. Li, M. Wang, D. Lou, W. Xia // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Vol. 45. – Pp. 146–156.
4. **Attar, H.** Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti-TiB composite materials manufactured by selective laser melting / H. Attar, L. Löber, A. Funk, M. Calin, L. C. Zhang, K. G. Prashanth, S. Scudino, Y. S. Zhang, J. Eckert // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2015. – Vol. 625. – Pp. 350–356.
5. **Huang S. H.** Additive manufacturing and its societal impact: a literature review / S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2013. – Vol.67. – Pp. 1191–1203.
6. **Gokuldoss P. K.** Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines / P. K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert // *Mater.* – 2017. – Vol.10. – P. 672.
7. **Sharkeev, Yu. P.** Structural and Phase State of Ti-Nb Alloy at Selective Laser Melting of the Composite Powder / Yu. P. Sharkeev, A. Yu. Eroshenko, Zh. G. Kovalevskaya, A. A. Saprykin, E. A. Ibragimov, I. A. Glukhov, M. A. Khimich, P. V. Uvarkin, E. V. Babakova // *Russian Physics Journal*. – 2016. – Vol.59(3). – Pp. 430–434.
8. **Sharkeev, Y. P.** Selective laser melting of the Ti-(40–50) wt.% Nb alloy / Y. P. Sharkeev, A. I. Dmitriev, A. G. Knyazeva, A. Yu. Eroshenko, A. A. Saprykin, M. A. Khimich, E. A. Ibragimov, I. A. Glukhov, A. M. Mairambekova, A. Y. Nikonov // *High Temperature Material Processes*. – 2017. – Vol.21 (2). – Pp. 161–183.
9. **Saprykin, A. A.** Surface formation mechanisms in selective laser melting of cobalt-chromium-molybdenum powder / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, E. A. Ibragimov // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol.839. – Pp. 73–78.
10. **Saprykin, A. A.** The mechanism of forming coagulated particles in selective laser melting of cobalt-chromium-molybdenum powder / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, E. A. Ibragimov // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol.839. – Pp. 79–85.
11. **Saprykin, A. A.** Formation of structural-phase state in a cobalt-chromium-molybdenum alloy by selective laser melting / A. A. Saprykin, Y. P. Sharkeev, N. A. Saprykina, M. A. Khimich, E. A. Ibragimov // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol.313. – Pp. 50–58.

Ссылка для цитирования:

Сапрыкина, Н.А. Влияние режимов селективного лазерного воздействия на пористость образцов из порошков кобальта, хрома и молибдена / Н.А. Сапрыкина, А.А. Сапрыкин, Ю.П. Шаркеев, Е.А. Ибрагимов, М.А. Химич // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 8. – С.22 - 28 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-22-28.

Статья поступила в редакцию 24.05.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета,
Агеев Е.В.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 26.07.21.

Сведения об авторах:

Сапрыкина Наталья Анатольевна, к.т.н., доцент Юргинского технологического института Томского политехнического университета, e-mail: saprikina@tpu.ru.

Сапрыкин Александр Александрович, к.т.н., доцент Юргинского технологического института Томского политехнического университета, e-mail: sapraa@tpu.ru.

Шаркеев Юрий Петрович, д.т.н., профессор Института физики прочности и материаловедения Си-

бирского отделения РАН, e-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru.

Ибрагимов Егор Артурович, к.т.н., ст. преподаватель Юргинского технологического института Томского политехнического университета, e-mail: egor83rus@tpu.ru.

Химич Маргарита Андреевна, к.т.н., мл. науч. сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, e-mail: khimich@ispms.tsc.ru.

Saprykina Natalia Anatolievna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Yurga Technological Institute of Tomsk Polytechnic University, e-mail: saprikina@tpu.ru.

Saprykin Alexander Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Yurga Technological Institute of Tomsk Polytechnic University, e-mail: sapraa@tpu.ru.

Sharkeev Yury Petrovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Institute of Strength Physics and Material Science, Siberia

Branch of RAS, e-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru.

Ibragimov Yegor Arturovich, Can. Sc. Tech., Senior Lecturer, Yurga Technological Institute of Tomsk Polytechnic University, e-mail: egor83rus@tpu.ru.

Khimich Margarita Andreevna, Can. Sc. Tech., Junior Research Assistant, Institute of Strength Physics and Material Science, Siberia Branch of RAS, e-mail: khimich@ispms.tsc.ru.