

УДК620.22-419.8-034.71

Д. В. Куис¹, А. Т. Волочко², А. А. Шегидевич², Н. А. Свидуневич¹,
С. Н. Лежнев³, А. В. Омелюсик¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси

³Карагандинский государственный индустриальный университет

АЛЮМИНИЕВЫЙ КОМПОЗИТ, АРМИРОВАННЫЙ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ Al–Cu–Fe

В лабораторных условиях изготовлены полуфабрикаты из сплава АК9, армированного порошком, содержащим стабильную квазикристаллическую фазу $Al_{65}Cu_{25}Fe_{12}$, β , λ , θ -фазы. В приведенных результатах показаны особенности структурного состояния изученных композитов, что благоприятно отразилось на комплексе их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Исследование триботехнических свойств композиционного материала на основе сплава АК9, армированного порошком $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, содержащим квазикристаллическую икосаэдрическую фазу, показало достаточно низкое и очень стабильное значение коэффициента трения. У образца с содержанием 15 мас. % квазикристаллических частиц наблюдается коэффициент трения на уровне 0,04–0,05, что очень близко по значению к керамическим материалам. При этом хрупкого разрушения образца не происходит, т. к. алюминиевая матрица выполняет роль связующего.

В сочетании с хорошими триботехническими характеристиками полученные композиты продемонстрировали повышенные прочностные свойства при высоких температурах. Так, без дополнительной термической обработки композиты имеют предел прочности при сжатии в 1,5–2 раза выше по сравнению с матрицей-основой. При испытаниях в температурном интервале 20–200°C образцы, армированные частицами квазикристалла, показывают высокие прочностные свойства. Так, при температуре 200°C предел прочности при сжатии увеличивается в 2–4 раза в зависимости от содержания квазикристаллических частиц в смеси.

Ключевые слова: композит, алюминий, квазикристалл, фаза, структура, свойства.

D. V. Kuis¹, A. T. Volochko², A. A. Shegidevich², N. A. Svidunovich¹,
S. N. Lezhnev³, A. V. Omelusik¹

¹Belarusian State Technological University

²Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

³Karaganda State Industrial University

ALUMINUM COMPOSITE REINFORCED BY QUASICRYSTAL PARTICLE Al–Cu–Fe

In the laboratory, semi-finished products were made from the alloy AK9 reinforced by powder containing stable quasicrystalline phase $Al_{65}Cu_{25}Fe_{12}$, β , λ , θ -phases. In the results above the features of the structural state of the studied composites are shown which have a positive impact on the complex physical-mechanical and operational properties.

Study of tribological properties of the composite material based on alloy AK9 reinforced by $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ powder containing icosahedral quasicrystalline phase showed quite low and very stable friction coefficient. In the sample containing 15 wt. % of quasicrystalline particles the friction coefficient of 0.04–0.05 is observed, which is close in value to the ceramic materials. And there is no brittle fracture of this sample because aluminum matrix acts as a binder.

In conjunction with good tribological properties the obtained composites showed increased strength properties at high temperatures. Composites with no extra heat treatment have compressive strength 1.5–2 times higher compared to the matrix-substrate. When tested in the temperature range of 20–200°C samples reinforced by quasicrystal particles show high strength properties, at temperature of 200°C, the compressive strength increases by 2–4 times depending on the contents of quasicrystalline particles in the mixture.

Key words: composite, aluminum quasicrystal, phase, structure, properties.

Введение. В настоящее время в связи с развитием микро- и нанотехнологий наблюдается повышенный интерес к получению и исследованию новых перспективных материалов, од-

ними из которых являются квазикристаллические сплавы различных симметрий [1].

Уникальная структура квазикристаллов определяет их необычные физико-химические

свойства. Квазикристаллы обладают низкой электро- и теплопроводностью, а также необычными оптическими свойствами. Для них характерны исключительно низкие коэффициенты трения и поверхностного натяжения, а также высокие твердость, износостойкость и коррозионная стойкость [2]. Наибольшее практическое значение имеет применение квазикристаллов в виде пленок, покрытий и составляющих композиционных материалов.

В настоящее время в мире намечена тенденция к возрастанию исследований в области создания и широкого применения металломатричных композиционных материалов. Наиболее дешевыми и надежными являются материалы на основе алюминиевых сплавов, подвергнутых модифицированию и армированию тугоплавкими дисперсными частицами. Среди отличительных свойств таких материалов можно выделить высокие антифрикционные и прочностные свойства, жаропрочность, жесткость, малую плотность, которые обеспечивают существенное снижение массы изделий и конструкций, уменьшают расход материала на изделие с одновременным повышением надежности и увеличением ресурса их работы.

Настоящая работа посвящена изучению возможности получения алюминиевых композитов, армированных микронными частицами стабильных квазикристаллов системы Al–Cu–Fe с повышенными триботехническими и механическими свойствами.

Основная часть. С использованием установки центробежного распыления был получен порошок с квазикристаллической структурой состава 65Al–23Cu–12Fe. Распределение частиц по фракциям приведено на рис. 1. Порошок получали при температуре перегрева 730–780°C расплава, при диаметре струи заливаемого металла 3–6 мм.

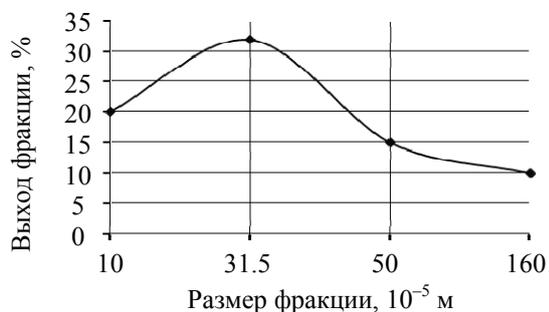


Рис. 2. Распределение частиц квазикристаллического порошка по фракциям

Для получения композитов использовали основу — мелкую стружку сплава АК9 с химическим составом, соответствующим ГОСТ 1583–93. Квазикристаллические частицы в виде порошка

и алюминиевую стружку смешивали в соотношениях АК9 – 3–40 мас. % квазикристаллический порошок Al–Cu–Fe. Подготовленную смесь загружали вместе с мелющими шарами в планетарную мельницу и подвергали механическому смешиванию в течение 30 мин со скоростью 200 об./мин. Полученную шихту компактировали в жестких контейнерах при давлении 10 кН, затем проводили горячее экструдирование по приведенной на рис. 3 схеме с коэффициентом вытяжки 12, при температуре 400–450°C. Результаты рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов показали наличие квазикристаллических фаз $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ во всех полученных образцах. На рентгенограммах полученных композитов фиксировались пики, соответствующие пикам квазикристаллической фазы $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ на рентгенограмме исходного порошка (рис. 5).

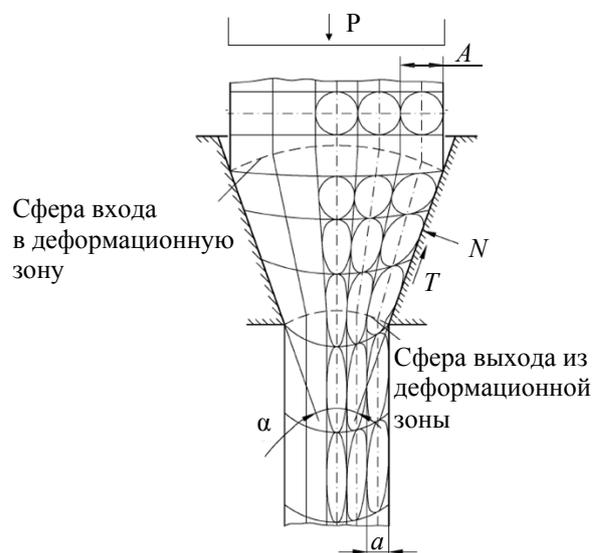


Рис. 3. Схема горячего экструдирования алюминиевых композитов, армированных квазикристаллическим порошком

образцы после механоактивации, компактирования и горячего экструдирования представляли собой прутки диаметром 10 мм.

На следующем этапе исследований изучалась структура и показатели свойств полученных образцов.

На рис. 4, а приведена микроструктура полученных прутковых полуфабрикатов с использованием и без квазикристаллических фаз. Отличительной особенностью структуры композита от исходного сплава-основы является наличие более темных равномерно распределенных включений, размеры которых находятся в диапазоне от 30 до 80 мкм. Как видно из рис. 4, на травленых образцах композитов данные частицы имеют ярко выраженный характер.

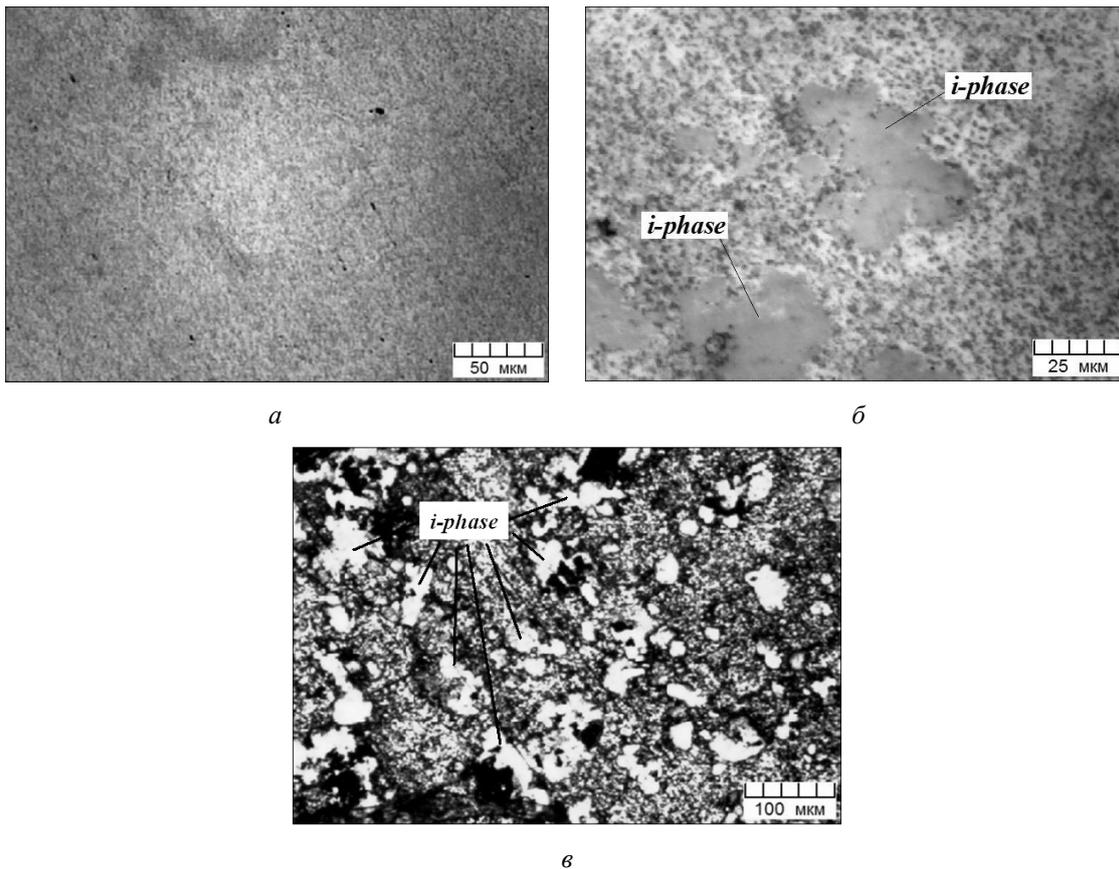


Рис. 4. Структура прутковых заготовок на основе стружки сплава АК9:
 а – исходный АК9; б – с квазикристаллическим порошком $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ без травления;
 в – с квазикристаллическим порошком $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ с применением травителя Келлера

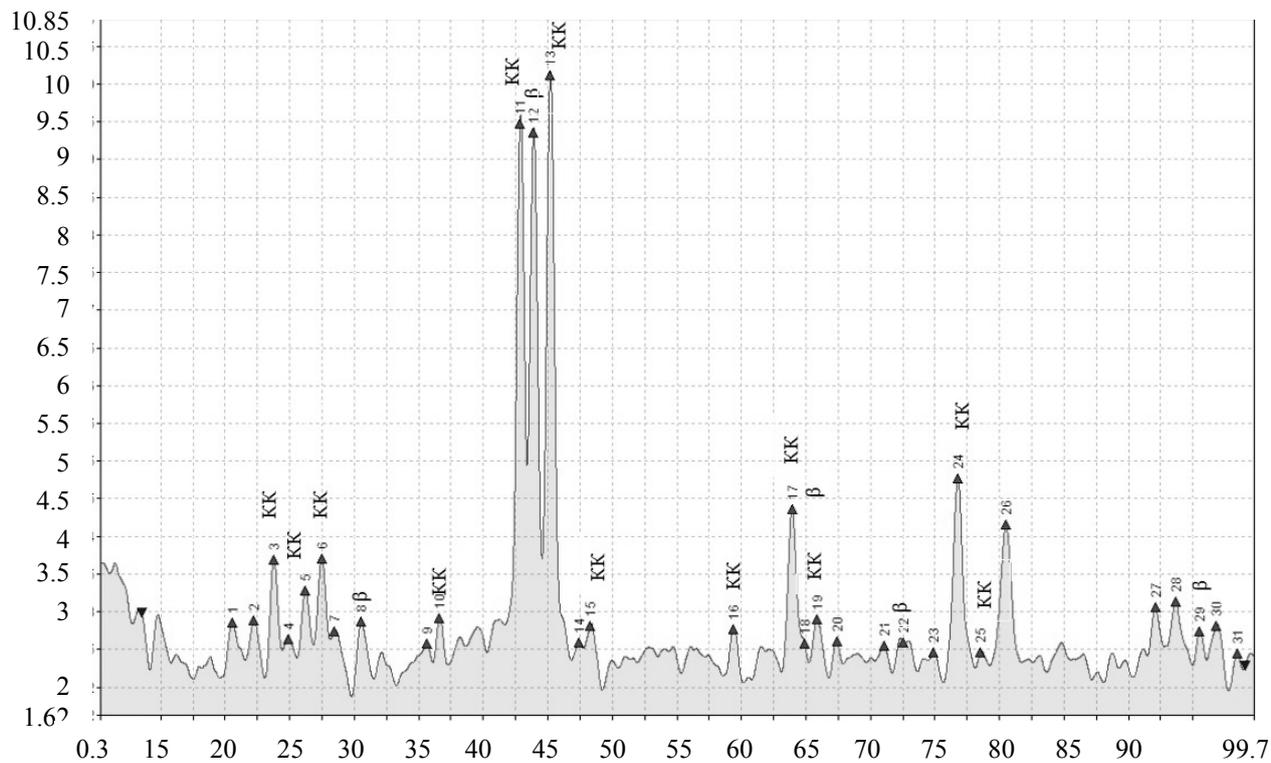


Рис. 5. Рентгенограмма квазикристаллического порошка $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$

В процессе исследований полученные композиты продемонстрировали повышенные прочностные свойства при повышенных температурах (рис. 5). При этом без дополнительной термической обработки композиты имеют предел прочности при сжатии в 1,5–2 раза выше по сравнению с матрицей-основой. При испытаниях в температурном интервале 20–200°C образцы, армированные частицами квазикристаллического порошка, показывают высокие прочностные свойства. Так, при температуре 200°C предел прочности при сжатии увеличивается в 2–4 раза в зависимости от содержания квазикристаллических частиц в смеси.

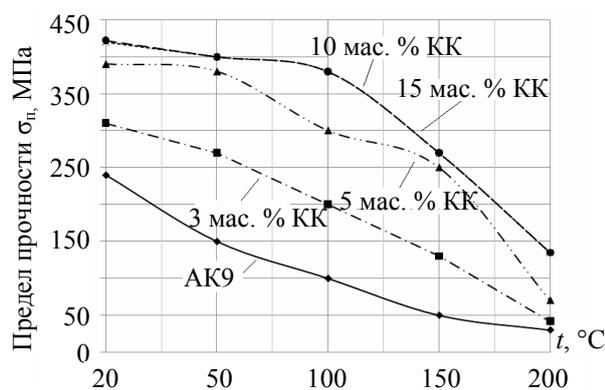


Рис. 5. Прочностные свойства сплава АК9 и композитов на его основе, армированных квазикристаллическим порошком $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$, в зависимости от температуры

Одновременно с этим наличие квазикристаллических включений в сплаве АК9 отрицательно влияет на пластичность при комнатной температуре. Данный недостаток широко описан в литературе, однозначно известно, что квазикристаллы очень хрупки, но при увеличении температуры данная характеристика способна увеличиваться. В настоящей работе эти данные нашли свое подтверждение на экспериментальном уровне.

Так, при увеличении величины нагрева образцов для испытаний пластических характеристик показано, что уже при 100°C начинается увеличение данной величины. При содержании 3 мас. % квазикристаллического порошка в композите δ начинает постепенно увеличиваться на 5–10%, а дальнейшее увеличение содержания квазикристаллического порошка в композите позволяет увеличить пластичность на 50–60%.

Данное наполнение матрицы также положительно влияет и на триботехнические свойства матрицы основы. На рис. 6 и 7 показаны массовая интенсивность изнашивания и коэффициент трения композитов в зависимости от процентного содержания квазикристаллического порошка в матрице-основе.

При исследовании интенсивности изнашивания установлено, что при содержании 15 мас. % в композите квазипорошка $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ происходит уменьшение данного показателя на 60–70%.

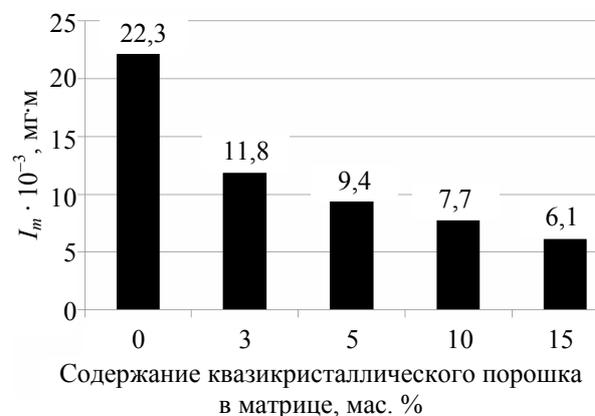


Рис. 6. Массовая интенсивность изнашивания сплава АК9 и композитов на его основе, армированных квазикристаллическим порошком $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$, в зависимости от его содержания

Армирование сплава АК9 микронными частицами квазипорошка системы Al–Cu–Fe, позволило получить достаточно низкое и очень стабильное значение коэффициента трения (рис. 7).

У образца с содержанием 15 мас. % квазикристаллических частиц наблюдается коэффициент трения на уровне 0,04–0,05, что очень близко по значению к керамическим материалам. При этом в ходе эксперимента хрупкого разрушения образца не происходит, т. к. алюминиевая матрица выполняет роль связующего.

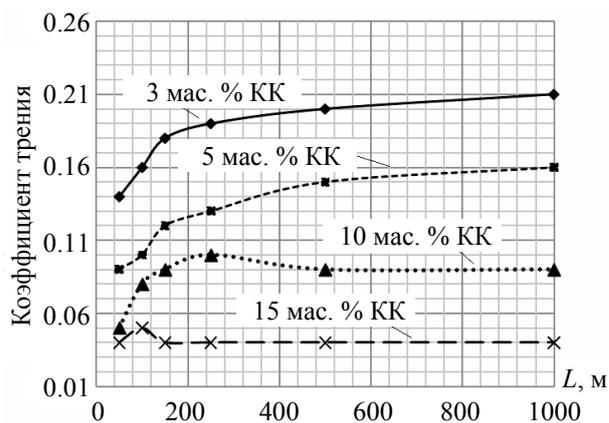


Рис. 7. Коэффициент трения композитов на основе сплава АК9, армированных квазикристаллическим порошком $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$

Заключение. Таким образом, армирование квазикристаллами алюминиевого сплава АК9 приводит к повышению триботехнических свойств композиционного материала и уровня

его прочности в широком интервале температур. Такие материалы могут стать серьезной основой для создания новых эффективных пар трения в тяжело нагруженных подшипниках скольжения автомобильной промышленности, транс-

порта и энергетики. Одним из направлений дальнейшего повышения механических свойств рассмотренного композитного материала является уменьшение размеров упрочняющих квазикристаллических частиц.

Литература

1. Miyazaki S., Kumai S., Sato A. Plastic Deformation of Al-Cu-Fe Quasicrystals Embedded in Al₂Cu at Low Temperatures // *Mater. Sci. Eng. A*. 2005.
2. Векилов Ю. Х., Черников М. А. Квазикристаллы // *Успехи физических наук. Обзор актуальных проблем*. М.: МИСИС, 2010. Т. 180, № 6. С. 561–586.

References

1. Miyazaki S., Kumai S., Sato A. Plastic Deformation of Al-Cu-Fe Quasicrystals Embedded in Al₂Cu at Low Temperatures. [*Mater. Sci. Eng. A*], 2005.
2. Vekilov Y. H., Chernikov M. A. Quasicrystals. *Uspekhi fizicheskikh nauk. Obzory aktual'nykh problem* [The successes of the physical sciences. Reviews of topical problems]. Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys, 2010, vol. 180, no. 6, pp. 561–586 (in Russian).

Информация об авторах

Куйс Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: DmitryKuis@mail.ru

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, заведующий лабораторией микрокристаллических и аморфных материалов. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: volockoat@mail.ru

Шегидевич Артем Артурович – научный сотрудник лаборатории микрокристаллических и аморфных материалов. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: sart.87@mail.ru

Свидуневич Николай Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mitm@belstu.by

Лежнев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, проректор по учебной работе. Карагандинский государственный индустриальный университет (101400, г. Темиртау, пр-т Республики, 30, Карагандинская обл., Республика Казахстан). E-mail: sergeylegnev@mail.ru

Омелюсик Алексей Валерьевич – инженер кафедры материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Alexlifting@mail.ru

Information about the authors

Kuis Dmitriy Valer'yevich – Ph. D. Engineering, assistant professor, head of Department of Materials Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: DmitryKuis@mail.ru

Volochko Aleksandr Tihonovich – D. Sc. Engineering, head of the Laboratory Microcrystalline and Amorphous Materials. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevicha str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volockoat@mail.ru

Shegidevich Artem Arturovich – research of the Laboratory Microcrystalline and Amorphous Materials. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevicha str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sart.87@mail.ru

Svidunovich Nikolay Alexandrovich – D. Sc. Engineering, professor, Department of Materials Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mitm@belstu.by

Lezhnev Sergey Nikolaevich – Ph. D. Engineering, Vice Rector for Academic Affairs. Karaganda State Industrial University (30, Republici Ave., 101400, Temirtau, Karaganda region, Kazakhstan). E-mail: sergeylegnev@mail.ru

Omelusik Aleksey Valer'yevich – engineer, Department of Material Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexlifting@mail.ru