УДК 546.26: 542.06

В.Б. Кульметьева, И.А. Мальцев, В.Э. ЧувашовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА Ni-Y КАТАЛИЗАТОРА
НА СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК**

Углеродные наноматериалы, в частности углеродные нанотрубки (УНТ), являются объектами изучения многих научно-исследовательских групп благодаря своим уникальным свойствам. Синтез углеродных нанотрубок методом пиролиза этанола является одним из самых перспективных, так как сочетает в себе высокий выход углеродного материала с невысокой себестоимостью, связанной с доступностью катализатора, углеродсодержащего материала и простотой установок для получения УНТ. Катализатор и сокатализатор в процессе синтеза играют очень важную роль, так как в основном от них зависит выход УНТ и их структура.

В работе исследовано влияние параметров синтеза и содержания оксида иттрия в качестве промотора в катализаторе на основе оксида никеля на получение углеродных нанотрубок методом пиролиза этанола на порошке оксида циркония. Методами дифференциального термического анализа, комбинационного рассеяния света и электронной микроскопии установлено, что в образцах с сокатализатором практически нет образования аморфного углерода, а дефектность нанотрубок немного ниже, при этом наличие промотора практически никак не влияет на форму и геометрические размеры получаемых нанотрубок. Увеличение температуры выдержки до 700 °С уменьшает выход углеродного материала, а при повышении температуры до 800 °С нанотрубки не образуются. Увеличение времени выдержки увеличивает выход углеродного материала. По результатам исследований лучшими параметрами для синтеза углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола является никелевый катализатор с 5 мас. % оксида иттрия, температура синтеза 650 °С, время синтеза 30 мин.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, пиролиз этанола, катализатор, морфология нанотрубок.

V.B. Kulmeteva, I.A. Maltsev, V.E. Chuvashov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

EFFECT OF NI-Y CATALYST ON THE CARBON NANOTUBE SINTERING

Carbon nanomaterials, such as carbon nanotubes (CNTs), are objects of study by many research groups because of their unique properties. Synthesis of carbon nanotubes by pyrolysis of ethanol is one of the most promising, since combines the high yield of the carbon material with a low cost associated with the availability of the catalyst, carbonaceous material and the simplicity of devices to produce CNT. The role of the catalyst and cocatalyst in the synthesis is very important, since they depend mainly on the yield and structure of the CNT.

The influence of the synthesis parameters and the content of yttrium oxide as a promoter in the catalyst based on nickel oxide to carbon nanotubes by pyrolysis of ethanol at zirconia powder. Methods of differential thermal analysis, Raman spectroscopy and electron microscopy revealed that the samples from the co-catalyst is practically no formation of amorphous carbon and defects of nanotubes is slightly lower, while the presence of promoter practically does not affect the shape and geometrical dimensions of the nanotubes produced. Increasing the temperature to 700 °C exposure decreases the yield of the carbon material, and the temperature is raised to 800 °C nanotubes are formed. Increasing the exposure time increases the yield of carbon material. According to the research the best settings for the synthesis of carbon nanotubes by catalytic pyrolysis of ethanol are nickel catalyst with 5 mass.% yttrium oxide, the synthesis temperature of 650 °C, time of synthesis - 30 minutes.

Keywords: carbon nanotubes, ethanol pyrolysis, catalytic, morphology of nanotubes.

Углеродные нанотрубки (УНТ) начиная с их открытия в 1991 г. и по настоящее время являются одним из наиболее перспективных и обсуждаемых в научной среде материалов. Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам УНТ, области применения их постоянно расширяются, это и наноэлектроника, композиционные материалы, катализ, медицина, хранение энергии и др. [1–3].

Среди методов синтеза углеродных нанотрубок выделяют две основные группы: испарение графита при высоких температурах 3000–4000 К с последующей конденсацией паров при охлаждении и каталитический пиролиз углеродсодержащих соединений, протекающий при темпера-

турах, не превышающих 1000 °С. Вторая группа методов считается наиболее перспективной, так как в большей степени подходит для промышленного производства. Данный метод позволяет получать значительные количества УНТ, имеет большое число доступных исходных реагентов, сравнительно невысокую энергоемкость и простоту аппаратурного оформления. На процесс роста и характеристики углеродных структур существенное влияние оказывают такие факторы, как состав газовой смеси прекурсора, природа и размер частиц катализатора, тип подложки, температура, давление и продолжительность процесса и т.д. [2, 4–7]. Наиболее часто в качестве катализаторов образования УНТ используют Fe, Ni, Co как индивидуально, так и их смеси, к которым добавляются промоторы.

Группой японских исследователей в 2002 г. методом низкотемпературного пиролиза на Fe-Co катализаторе при использовании в качестве исходного реагента паров этанола были получены однослойные УНТ, которые практически не содержали аморфного углерода, многослойных нанотрубок и других углеродсодержащих примесей [8]. По мнению авторов, особенностью процесса является то, что при пиролизе паров этанола образуются ОН-радикалы, обладающие повышенной реакционной способностью по отношению к дефектному углероду.

Для синтеза УНТ данным методом применялись также и другие катализаторы. Так, в работе [9] для нахождения оптимальных условий синтеза однослойных УНТ сравнивались три типа катализатора: Fe/Co, Mo/Co, Rh/Pd. Установлено, что для этанола лучшим из трех является катализатор молибден-кобальт.

Авторы работы [10] также исследовали эффективность различных катализаторов при синтезе однослойных углеродных нанотрубок из паров этанола. В качестве катализаторов использовались ацетаты Co, Fe, Mo, Ni и биметаллические смеси. В ходе исследований было установлено, что чистые никель и кобальт проявляют высокую каталитическую активность, железо имеет слабые каталитические свойства, а молибден не работает как катализатор совсем. По данным [11], несмотря на то, что Ni, Co, Fe принадлежат к одной группе металлов, их поведение в процессе каталитического пиролиза паров этанола существенно различается. Автором показано, что их каталитическая активность зависит от расхода этанола. Так, по сравнению с железным и кобальтовым катализаторами наибольшей каталитической активностью обладает никель, также у него существенно шире температурный диапазон, в котором пиролиз этанола протекает с высоким выходом.

Согласно расчетной модели [12], позволяющей предварительно оценить эффективность разных катализаторов и их комбинаций, оптимальным сокатализатором для никеля является иттрий, положительное влияние которого на качество нанотрубного материала, полученного при пиролизе пропан-бутановой смеси, отмечено в работе [2].

Целью настоящей работы было изучение влияния введения оксида иттрия в качестве сокатализатора в никельсодержащий катализатор для получения УНТ методом пиролиза паров этанола на установке CVDomna, которая имеет конструктивные особенности в отличие от применяемых горизонтальных реакторов с внешним нагревом.

Экспериментальная часть

Синтез УНТ осуществляли на установке CVDomna (NanoDevice Technology, Россия) [13] при температуре 650–800 °С методом пиролиза паров этанола (96 %) при давлении 15–17 кПа. В качестве носителя катализатора использовали порошок ZrO_2 , стабилизированного 3 мол. % Y_2O_3 , со средним размером частиц 65 ± 10 нм. Порошок носителя смешивали с 1 М растворами $Ni(NO_3)_2$ и $Y(NO_3)_3$ в этаноле из расчета получения в смеси при разложении нитратов 10 мас. % катализатора от массы носителя. Полученную смесь высушивали и растирали. Содержание Y_2O_3 в катализаторе варьировали от 0 до 40 мас. %. Разложение нитратов никеля и иттрия до оксидов проводили в реакторе непосредственно перед осаждением УНТ.

Удельный выход углеродного наноматериала определяли термogravиметрическим методом и рассчитывали по формуле

$$K_c = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2}, \quad (1)$$

где m_1 – масса катализатора после осаждения углерода, г; m_2 – масса катализатора после отжига на воздухе (1000 °С), г.

Дифференциальный термический анализ продуктов синтеза проводили на дериватографе Q-1500D системы Paulic-Paulic-Erdey до температуры 1000 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. Характеристики нанотрубок изучали методом спектроскопии комбинационного рассеяния света на многофункциональном спектрометре SENTERRA (Bruker) при длине волны излучения 532 нм. Микроструктурный анализ нанотрубного материала проводили с помощью аналитического автоэмиссионного растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA (Чехия).

Результаты и их обсуждение

Было исследовано влияние процентного содержания оксида иттрия в никелевом катализаторе на удельный выход углерода после синтеза при температуре 650 °С с выдержкой при напуске парогазовой смеси (ПГС) в течение 17 мин.

Как видно на рис. 1, введение оксида иттрия в никельсодержащий катализатор до 10 мас. % приводит к росту удельного выхода углерода с 0,153 до 0,203. Дальнейшее увеличение содержания оксида иттрия в катализаторе вызывает снижение выхода углерода. Так, при содержании Y_2O_3 40 мас. % удельный выход углерода составляет всего 0,042.

Рис. 1. Влияние содержания оксида иттрия на удельный выход углерода при температуре синтеза 650° С, выдержка 20 мин, в том числе 3 мин без напуска ПГС

По данным дифференциально-термического анализа потери массы, связанные с окислением нанотрубного материала, вне зависимости от содержания оксида иттрия начинаются при температуре около 300 °С (рис. 2). Максимальное значение потери массы составляет 25,6 % при содержании оксида иттрия в катализаторе 10 мас. %.

На кривой ДТА для всех образцов УНТ, полученных на катализаторе с оксидом иттрия, видно наличие асимметричного экзотермического пика с одним максимумом в интервале температур 545–565 °С. У образцов УНТ, синтезированных на чисто никелевом катализаторе, экзопик имеет два максимума при температурах 530 и 570 °С. Наличие небольшого плеча в низкотемпературной области свидетельствует о небольшом количестве аморфного углерода, так как он сгорает в температурном интервале 300–500 °С.

Рис. 2. Дериwатогpаммы углеродсодержащих образцов:
a – 0 % Y_2O_3 ; *б* – 10 % Y_2O_3 ; *в* – 30 % Y_2O_3

Температуры начала окисления многослойных и однослойных нанотрубок соответственно равны 500–510 °С и выше 600 °С [3, 14]. В значительной степени температура окисления УНТ зависит от степени их дефектности, количества слоев, наличия частиц катализатора, что во многом определяется методом синтеза нанотрубок.

В работе [15] на основе термогравиметрического анализа температурный интервал окисления однослойных УНТ, полученных пиролизом этанола на Fe-Co катализаторе, определен в диапазоне 500–700 °С. Авторы сравнивали полученные данные с результатами окисления очищенных однослойных УНТ, синтезированных методами лазерной абляции и HiPCo.

Таким образом, основную массу полученного углеродного материала составляют многослойные УНТ с небольшим содержанием однослойных, что подтверждается данными спектроскопии комбинационного рассеяния света.

На рис. 3 представлены КР-спектры синтезированных УНТ с различным содержанием оксида иттрия в никелевом катализаторе. Спектр многослойных нанотрубок не имеет характерных особенностей, которые позволяют их однозначно идентифицировать. Такой же спектр могут показывать другие углеродные материалы, содержащие неупорядоченный графит. Особенным спектром обладают лишь однослойные нанотрубки.

Рис. 3. КР-спектры синтезированных УНТ: 1 – без оксида иттрия; 2 – с 10 % оксида иттрия; 3 – с 40 % оксида иттрия

На спектрах комбинационного рассеяния света нанотрубных образцов отмечено наличие характерных углеродным нанотрубкам полос, положение и интенсивность которых соответствует литературным данным [14]. В КР-спектрах синтезированных УНТ наблюдаются G- и D-полосы, максимальная интенсивность которых находится в интервале 1589–1593 и 1345–1350 см^{-1} соответственно. Нанотрубки в основном многослойные, потому что RBM-полоса, которая присутствует только в спектрах однослойных УНТ, недостаточно четко выражена.

D-полосу связывают с наличием дефектов в графитовых плоскостях, поэтому отношение интенсивностей пиков I_D/I_G используют для оценки степени дефектности нанотрубок. Для хороших образцов с малым количеством дефектов интенсивность D-полосы значительно меньше интенсивности G-полосы [14]. Как видно из КР-спектров, синтезированные УНТ обладают большим количеством дефектов, так как интенсивность D-полосы больше интенсивности G-полосы, что характерно для УНТ, полученных каталитическим пиролизом углеводородов [4].

С повышением процентного содержания оксида иттрия в катализаторе дефектность нанотрубок снижается, так как уменьшается отношение интенсивностей I_D/I_G пиков (рис. 4). При увеличении концентрации оксида иттрия с 0 до 30 % отношение интенсивностей I_D/I_G снижается с 2,3 до 1,52, но при этом значительно уменьшается и удельный выход углерода. Поэтому в дальнейшем рассматривались концентрации Y_2O_3 от 0 до 10 мас. %.

Рис. 4. Соотношение интенсивности пиков I_D/I_G в зависимости от содержания оксида иттрия в катализаторе

По данным, полученным S. Maruyama et al., оптимальной температурой для синтеза УНТ методом пиролиза этанола является 800 °С,

при этом происходило снижение степени дефектности у полученных УНТ [8]. Поэтому было изучено влияние температуры и продолжительности синтеза на характеристики УНТ.

Температуру синтеза варьировали от 650 до 800 °С. Продолжительность выдержки при напуске ПГС составляла 17 и 30 мин. Данные о влиянии температуры и продолжительности выдержки на удельный выход углерода и соотношение интенсивностей пиков I_D/I_G представлены на рис. 5.

Рис. 5. Влияние температуры и продолжительности выдержки на удельный выход углерода (а) и соотношение интенсивностей пиков I_D/I_G (б) в зависимости от содержания оксида иттрия в катализаторе

Установлено, что повышение температуры синтеза до 700 °С приводит к снижению удельного выхода углерода в 3 раза вне зависимости от содержания оксида иттрия в катализаторе (рис. 5, *а*). По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света образование УНТ при температуре синтеза 800 °С не происходит, наблюдается вырождение КР-спектра нанотрубок (рис. 6, *в*). Однако отмечено, что повышение температуры синтеза приводит к снижению соотношения интенсивностей пиков I_D/I_G почти в 2 раза (рис. 5, *б*), а RBM полоса становится более выраженной (рис. 6, *а, б*).

Рис. 6. КР-спектры УНТ, полученных при температурах: *а* – 650; *б* – 700; *в* – 800 °С. Продолжительность выдержки при напуске ПГС 17 мин, содержание Y_2O_3 в никель-иттриевом катализаторе 5 мас. %

На рис. 7 представлены СЭМ-изображения УНТ, полученных при оптимальных параметрах синтеза на катализаторе без и с 5 мас. % оксида иттрия. Диаметр нанотрубок составляет около 20 нм вне зависимости от состава катализатора. Нанотрубки, полученные на катализаторе с оксидом иттрия, менее искривлены и имеют не такое плотное переплетение в отличие от УНТ, полученных на катализаторе без Y_2O_3 .

Рис. 7. СЭМ-изображения УНТ, полученных при температуре синтеза 650 °С и продолжительности выдержки 30 мин, содержание оксида иттрия в катализаторе, мас. %: а – 0; б – 5. (Увеличение $\times 50\,000$)

Таким образом, наилучшими параметрами для синтеза УНТ методом каталитического пиролиза паров этанола являются: Ni-Y катализатор, в котором содержание оксида иттрия составляет 5 мас. %; температура синтеза 650 °С и выдержка при напуске ПГС 30 мин, так как при этих параметрах наблюдается наибольший удельный выход углерода, а полученные УНТ отличаются меньшей степенью дефектности.

Список литературы

1. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
2. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 4. – С. 401–438.
4. Раков Э.Г. Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон // Российский химический журнал. – 2004. – Т. XLVIII, № 5. – С. 12–20.
5. Фурсиков П.В., Тарасов Б.П. Каталитический синтез и свойства углеродных нановолокон и нанотрубок // Альтернативная энергетика и экология. – 2004. – № 10 (18). – С. 24–40.
6. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Способы получения упорядоченных углеродных нанотрубок и нановолокон методом химического осаждения из пара // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 10(42). – С. 45–51.

7. Kumar M., Ando Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 10. – P. 3739–3758.

8. Low-temperature synthesis of high-purity single-walled carbon nanotubes from alcohol / S. Maruyama [et al.] // *Chem. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 360. – P. 229–234.

9. Inoue Sh., Nakajima T., Kikuchi Y. Synthesis of single-wall carbon nanotubes from alcohol using Fe/Co, Mo/Co, Rh/Pd catalysts // *Chem. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 406. – P. 184–187.

10. A study of the effect of different catalysts for the efficient CVD growth of carbon nanotubes on silicon substrates / A. Ansaldo [et al.] // *Physica E*. – 2007. – Vol. 37. – P. 6–10.

11. Редькин А.Н. Контролируемый газофазный синтез наноструктур для наноэлектроники, фотоники и микросистемной техники: дис. ... д-ра техн. наук. – Черноголовка, 2012. – 325 с.

12. Алексеев Н.И., Афанасьев Д.В., Чарыков Н.А. О возможности расчета оптимальных катализаторов и сокатализаторов при химическом методе выращивания углеродных нанотрубок // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 5, вып. 5. – С. 945–953.

13. Неволин В.К., Симунин М.М. Получение углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // *Наноиндустрия*. – 2007. – №3. – С. 34–36.

14. Удовицкий В.Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // *Журнал физики и инженерии поверхности*. – 2009. – Т. 7, № 4. – С. 351–373.

15. Characterization of single-walled carbon nanotubes catalytically synthesized from alcohol / Y. Murakami, Y. Miyauchi, Sh. Chiashi, Sh. Maruyama // *Chem. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 374. – P. 53–58.

References

1. Dyachkov P.V. Uglerodnye nanotrubki: stroenie, svojstva, primeneniya [Carbon nanotubes: structure, properties, applications]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006. 293 p.

2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Uglerodnye materialy. Proizvodstvo, svojstva, primeneniye [Carbon nanomaterials. Production, Properties, Applications]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 320 p.

3. Eletskij A.V. Uglerodnye nanotrubki i ikh emissionnye svojstva [Carbon nanotubes and their emission properties]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2002, T. 172, no. 4, pp. 401–438.

4. Rakov E.G. Piroliticheskij sintez uglerodnykh nanotrubok i nanovolokon [Pyrolytic synthesis of carbon nanotubes and nanofibers]. *Rossijskij khimicheskij zhurnal*, 2004, vol. XLVIII, no. 5, pp. 12–20.
5. Fursikov P.V., Tarasov B.P. Kataliticheskij sintez i svojstva uglerodnykh nanovolokon i nanotrubok [Catalytic synthesis and properties of carbon nanofibers and nanotubes. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2004, no. 10(18), pp. 24–40.
6. Zolotukhin I.V., Kalinin Ju.E., Sitnikov A.V. Sposoby polucheniya uporyadochennykh uglerodnykh nanotrubok i nanovolokon metodom khimicheskogo osazhdeniya iz para [Methods for production of ordered carbon nanotubes and nanofibers via chemical steam evaporation]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2006, no. 10(42), pp. 45–51.
7. Kumar M., Ando Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, vol. 10, pp. 3739–3758.
8. Maruyama S. [et al.] Low-temperature synthesis of high-purity single-walled carbon nanotubes from alcohol. *Chem. Phys. Lett.* 2002, vol. 360, pp. 229–234.
9. Inoue Sh., Nakajima T., Kikuchi Y. Synthesis of single-wall carbon nanotubes from alcohol using Fe/Co, Mo/Co, Rh/Pd catalysts. *Chem. Phys. Lett.*, 2005, vol. 406, pp. 184–187.
10. Ansaldo A. [et al.] A study of the effect of different catalysts for the efficient CVD growth of carbon nanotubes on silicon substrates. *Physica E*, 2007, vol. 37, pp. 6–10.
11. Redkin A.N. Kontroliruemij gazofaznij sintez nanostruktur dlya nanoelektroniki, fotoniki i mikrosistemnoj tekhniki [Controlled gas-phase synthesis of nanostructures for nanoelectronics, photonics and microsystems technology]. Thesis of doctor's degree dissertation. Chernogolovka, 2012. 325 p.
12. Alekseev N.I., Afanas'ev D.V., Charykov N.A. O vozmozhnosti rashchota optimal'nykh katalizatorov i sokatalizatorov pri khimicheskom metode vyrashchivaniya uglerodnykh nanotrubok [The possibility of calculating the optimal catalysts and to catalysts in chemical method of growing carbon nanotubes]. *Fizika tvjordogo tela*, 2008, vol. 5, no. 5, pp. 945–953.
13. Nevolin V.K., Simunin M.M. Poluchenie uglerodnykh nanotrubok metodom kataliticheskogo piroliza etanola iz gazovoj fazy [Production of carbon nanotubes by catalytic gas-phase pyrolysis of ethanol. *Nanoindustriya*, 2007, no. 3, pp. 34–36.

14. Udovitskij V.G. Metody otsenki chistoty i kharakterizatsii svoystv uglerodnykh nanotrubok [Methods for assessing the purity and characterization of the properties of carbon nanotubes]. *Zhurnal fiziki I inzhenerii poverkhnosti*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 351–373.

15. Murakami Y., Miyauchi Y., Chiashi Sh., Maruyama Sh. Characterization of single-walled carbon nanotubes catalytically synthesized from alcohol. *Chem. Phys. Lett*, 2003, vol. 374, pp. 53–58.

Получено 17.12.2015

Об авторах

Кульметьева Валентина Борисовна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: keramik@pm.pstu.ac.ru).

Мальцев Игорь Александрович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: ajibmohax@rambler.ru).

Чувашов Вячеслав Эдуардович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: teashark9999@yandex.ru).

About the authors

Valentina B. Kulmeteva (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of materials, technologies and construction machinery, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: keramik@pm.pstu.ac.ru).

Igor A. Maltsev (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of materials, technologies and construction machinery, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: ajibmohax@rambler.ru).

Vyacheslav E. Chuvashov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of materials, technologies and construction machinery, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: teashark9999@yandex.ru).