

УДК 666.94: 621762

В.Ф. Олонцев, А.А. Минькова, В.И. МитинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛИЗАЦИИ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Измельчение или диспергирование твердых материалов, характерное как для природных, так и техногенных материалов, является первым этапом их весьма энергозатратной переработки. Материалы отличаются прочностью, характеризуемой напряжением разрушения, соответствующим энергии атомов на поверхности раздела. При измельчении до состояния тонких и сверхтонких порошков с прочностью имеют дело только в начале измельчения, а потом с большими напряжениями преодолевается прочность, при которой разрушение идет по объему кристаллов. Эта прочность соответствует энергии кристаллической решетки. Такое измельчение относится к помолу.

В данной работе обращено внимание на необходимость снижения затрат энергии на электризацию измельчаемого материала, ее предотвращение, что способствует улучшению размалываемости материала, снижению агрегации сверхтонкого порошка и его адгезии к мелющим телам, а в итоге снижению удельного расхода энергии при измельчении. Наглядно показаны практические результаты применения устройства в некоторых конкретных случаях.

Устройство ЭКОФОР нейтрализует свободные электрические носители в ходе помола. Оно действует в мельнице совместно с естественно происходящей нейтрализацией заряда в результате коронного разряда и действия заземления. Таким образом устройство дополнительно снижает электростатические проявления в ходе помола и устраняет их негативные последствия. При этом активно используется металлическая поверхность мелющих тел. Устройство преобразует процессы, протекающие на границе измельчаемого материала и приповерхностного слоя мелющих тел, обеспечивая воздействие на обе взаимодействующие фазы.

Ключевые слова: *измельчение твердых материалов, агрегация сверхтонкого порошка, электризация дисперсных материалов, адгезия частиц.*

V.F. Olontsev, A.A. Minkova, V.I. Mitin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

EFFECT OF ELECTRONEUTRALIZATION AT PROCESSING OF DISPERSE MATERIALS

Shredding or dispersion of solid materials, typical for both natural and man-made materials, is the first stage of a very energy-intensive processing. Characterized strength material, characterized destruction voltage corresponding to the energy of atoms at the interface. When grinding to the state of fine and ultrafine powders with durability deal only at the beginning of grinding, and then with a lot of stress overcomes the strength at which the destruction is on the volume of crystals. This strength corresponds to the energy of the crystal lattice. Such grinding refers to grinding.

In this paper attention was drawn to the need to reduce energy costs in the electrification of crushed material, its prevention. This improves the grinding material, reduces aggregation of ultrafine powder and its adhesion to the grinding bodies. As a result this leads to a reduction in specific energy consumption during grinding. Described alternative hardware, betrachten tool to reduce the negative effects of electrification of the material during grinding – active converter. The practical results of application in some specific cases are illustrated.

The device ECOFOR neutralizes free electric vehicles during grinding. It acts in a mill together with the naturally occurring neutralizing the charge as a result of corona discharge, and the grounding action. Thus, it further reduces the electrostatic manifestations during grinding and eliminating their negative effects. In this widely used metal surface grinding bodies. The device converts the processes taking place on the border of the crushed material and the surface layer of milling bodies, providing exposure to both interacting phase.

Keywords: *grinding of hard materials, aggregation of a superfine powder, electrization of disperse materials, adhesion of particles.*

Введение

Проблема энергосбережения при измельчении твердых материалов природного и техногенного происхождения весьма актуальна. Ежегодно в мире перерабатывается более 20 млрд т этих материалов.

Существенный вклад в решение этой проблемы в прошлом веке был внесен академиком П.А. Ребиндером, открывшим явление адсорбционного понижения прочности твердых тел при диспергировании [1].

При этом упругая энергия, накопленная в материале за счет предшествующей деформации, минуя этап его пластифицирования, приводит к более интенсивному образованию новых поверхностей. При дальнейшем увеличении удельной поверхности наступает этап агрегации мельчайших частиц и адгезии их на поверхности мелющих тел, где, по мнению академика Б.В. Дерягина, главную роль играют электростатические силы [2]. Механизм адсорбции также определяется силами электростатического взаимодействия и является антистатическим. Это предполагает использование не только реагентных, поверхностно-активных, но и аппаратных, электрофизических средств нейтрализации. Измельчение или диспергирование твердых материалов, характерное как для природных, так и техногенных материалов, является первым этапом их весьма энергозатратной переработки. При этом особо выделяется производство тонких порошков [3]. Измельчение по технологическим переделам бывает сухим или мокрым, причем удельный расход электроэнергии на помол при сухом способе помола на 30 % выше, чем при мокрым. Это связано с поверхностно-активными, интенсифицирующими свойствами воды. В данной работе исследуется эффективность сухого способа измельчения, вопрос энергосбережения которого более актуален. Рассматривая процессы образования и разрушения дисперсных систем, а также поверхностные свойства на границах раздела фаз в этих системах, необходимо отметить, что особый интерес представляют электрические свойства поверхностных слоев в дисперсных системах. Известно, что ни одно изменение в природе не происходит без сопровождения его какими-либо электрическими явлениями. Это относится и к изменениям, происходящим в процессе измельчения неоднородных твердых материалов. Процесс разрушения твердого тела не является лишь чисто механическим процессом его деления, а сопровождается электрофизическими явлениями, в том числе разрывом двойных электрических слоев, которые образовались ориентированными полярными молекулами в соприкасающихся фазах при их стремлении к уменьшению поверхностной энергии. Причем, если разрыв двойного электрического слоя происходит быстро, то электростатические силы и плотность заряда увеличиваются [4].

Процесс измельчения твердых тел можно интенсифицировать, благодаря снижению влияния электростатической составляющей силы адгезии, что исключает налипание на мелющие тела и агрегации порошка.

Оборудование

В данной работе обращено внимание на необходимость снижения затрат энергии на электризацию измельчаемого материала, ее предотвращение, что улучшает размалываемость материала, снижает агрегацию сверхтонкого порошка и его адгезию к мелющим телам, а в итоге снижает удельный расход энергии при измельчении. Эти результаты в определенной степени достижимы благодаря адсорбционному, нейтрализующему воздействию ПАВ, требующих, тем не менее, большого расхода. Дополнительно, а в ряде случаев альтернативно к технологии применения ПАВ разработано и внедряется аппаратное, безрасходное средство для снижения негативных проявлений электризации материала во время измельчения – активный нейтрализатор, в дальнейшем – устройство ЭКОФОР [5, 6].

Активный нейтрализатор – устройство ЭКОФОР модель ЭФ-01-03 выпускается по ТУ 4218-002-59456824–2007 и в соответствии с ранее упомянутыми патентами РФ. Устройство повышает эффективность дробилок и мельниц сухого помола на 8–25 %, удельный расход электроэнергии снижается на 8–20 %.

Напряжение питающей сети устройства 230 В, частота тока 50–60 Гц, потребляемый ток не более 0,5 А, допустимое предельное отклонение напряжения питающей сети от 5 до 10 %.

Второе поколение устройства предусматривает универсальность использования его электропитания от сети как с заземленной, так и изолированной нейтралью.

Устройство содержит трансформатор, опломбированный конвертер, в том числе с генератором пульсирующего потенциала, выключатель питания, кнопочный выключатель, светодиодные индикаторы, защитные предохранители, плату соединительную и леммный набор. Устройство включается выключателем питания с одновременной световой индикацией.

Металлическая часть оборудования, которая находится в непосредственном контакте с измельчаемым материалом, подключается к клемме «Е» устройства, связанной с конвертером, который подключается также и к заземляющему устройству объекта. Конвертер обеспечивает более полное снятие электрических зарядов с обрабатываемого материала. Параметры работы конвертера устанавливаются при настройке устройства изготовителем. Корпус устройства должен быть надежно заземлен внутри шкафа отдельной линией. Устройство не требует

отключения во время эксплуатационных остановок оборудования. Срок его службы составляет 10 лет. Оно используется для интенсификации конусных дробилок, шаровых мельниц открытого и замкнутого цикла помола (в том числе и с применением жидких интенсификаторов помола), а также вертикальных валковых мельниц. Эффективна его работа на системах предварительного измельчения и вибрационных мельницах.

Методы и эксперименты

Более подробно рассмотрим экспериментальный материал на примере работы вибрационных мельниц с использованием технологии электронейтрализации.

Вибрационные мельницы используются для тонкого помола. В них основными механизмами воздействия на измельчаемый материал является удар и раскалывание. Ускорение мелющих тел при этом в десять раз превышает ускорение силы тяжести, принципиально возможное в традиционных шаровых мельницах. В результате этого измельчаемые частицы приобретают в основном осколочную форму, вследствие чего повышается активность продукта. Такие мельницы используются для помола цемента, измельчения известково-песчаных смесей, золы-уноса, руд, керамической шихты. На базе мельниц такого типа может быть реализована концепция цементного завода будущего [7], при которой помольные установки, измельчающие покупной клинкер, будут работать непосредственно у строителей. В этом случае может быть реализована гибкая система производства марок цемента, а стадия хранения измельченного продукта с потерей им активности будет исключена. Например, ООО «Опытный завод со специальным бюро» (Москва), выпускает вибрационные мельницы непрерывного действия СВМ-160 и СВМ-320 с производительностью по кварцевому песку 2,6 и 5,2 т/ч соответственно.

Мельница состоит из двух цилиндрических горизонтальных камер, расположенных одна под другой и объединенных траверсами с дебалансным вибратором. При вращении вала этого вибровозбудителя камеры приводятся в поступательное движение, но траектории, близкой к круговой. Движение от стенок камеры передается мелющим телам, в зонах контакта между телами происходит измельчение частиц материала. Частота колебаний составляет 16,5 Гц. Устройство ЭКОФОР подключается к корпусу верхней камеры мельницы.

1. Помол химически осажденного мела. Проведены многочисленные опыты по тонкому измельчению химически осажденного мела, при-

меняемого в качестве наполнителя при производстве красок. Использовалась модельная, вибрационная мельница БГМ-5/5 с объемом 3 дм³, периодического действия. Гранулометрический состав измельченных порошков определялся на анализаторе «МОПВидеоплан» производства ФРГ.

Опыты показали, что без специальных приемов измельчить мел тоньше 36 мкм (при продолжительности измельчения 30 мин) не удастся. При более длительном помоле происходит агрегирование частиц, налипание материала на шары, и измельчение практически прекращается.

После подключения устройства ЭКОФОР шары и барабан очистились от налипшего материала, и мел начал измельчаться до 10–15 мкм. Дальнейшее измельчение происходило только с добавкой интенсификатора помола, который совместно с устройством ЭКОФОР сдвигали начало агрегирования частиц, обладающих развитой, механически активированной поверхностью.

Из табл. 1 и 2 видно, что при одинаковых режимах измельчения (опыты 1 и 3) крупность продукта составили менее 14 мкм по 5 % остатку в опыте 1 и менее 2 мкм в опыте 3, который был проведен с подключением устройства ЭКОФОР. Эффективность измельчения с устройством существенно возрастает. Результаты дифференциальных и интегральных распределений частиц продукта приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты помола без ЭКОФОР

Показатель	Выход (%) продукта в опытах			
	№ 1		№ 2	
	диф.	интегр.	диф.	интегр.
Крупность продукта, мкм:				
–20+16	2,2	100		
–16+14	1,88	97,8		
–14+12	4,04	95,92		
–12+10	2,26	91,88	1,78	100
–10+9	1,94	89,63	1,64	98,22
–9+8	2,61	87,69	3,65	96,58
–8+7	2,3	85,08	3,22	92,93
–7+6	6,65	82,78	2,79	89,71
–6+5	11,82	76,13	1,57	86,92
–5+4	7,37	64,31	3,22	85,35
–4+3	8,24	56,94	11,51	82,13
–3+2	13,3	48,7	21,8	70,62

Окончание табл. 1

Показатель	Выход (%) продукта в опытах			
	№ 1		№ 2	
	диф.	интегр.	диф.	интегр.
-2+1	24,4	35,4	31,9	48,82
-1+0	11	11	17,73	17,73
Удельная поверхность, см ² /г	12330		13520	
Время измельчения, мин	60		60	
Добавка интенсификатора, %	1,0		1,4	

Таблица 2

Результаты помола с ЭКОФОР

Показатель	Выход (%) продукта в опытах					
	№ 3		№ 4		№ 5	
	диф.	интегр.	диф.	интегр.	диф.	интегр.
Крупность продукта, мкм:						
-20+16			0,98	100		
-16+14			4,95	99,02		
-14+12			1,47	94,07		
-12+10			2,17	92,6		
-10+9			1,03	90,43	2,7	100
-9+8			0,92	89,4	2,38	97,3
-8+7	5,08	100	1,63	88,48	1,07	94,92
-7+6	8,93	94,92	0,71	86,85	3,26	93,85
-6+5	4,53	85,99	2,99	86,14	2,07	90,59
-5+4	6,8	81,46	3,92	83,15	7,9	88,52
-4+3	10,1	74,66	9,52	79,23	6,58	80,62
-3+2	13,05	64,56	12,78	69,71	11,97	74,04
-2+1	34,41	51,51	40,78	56,93	45,89	62,07
-1+0	17,10	17,10	16,15	16,15	16,18	16,18
Удельная поверхность, см ² /г	14900		14800		15000	
Время измельчения, мин	60		40		60	
Добавка интенсификатора, %	1,0		1,0		1,0	

В опыте 2 добавка интенсификатора составила 1,4 %, и был получен продукт крупностью мельче 9 мкм, а в опыте 3 с устройством ЭКОФОР крупность продукта составила менее 7 мкм при расходе интенсификатора 1,0 %. Следовательно, устройство позволило снизить его расход для тонкого помола в 1,4–1,5 раза.

Сравнение опытов 1 и 4 показывает, что при прочих одинаковых условиях и одинаковой крупности готового продукта подключение уст-

ройства позволило в опыте 4 снизить время измельчения с 60 до 40 мин, т.е. увеличить производительность мельницы в 1,5 раза.

В опыте 5 был получен самый тонкий продукт, содержащий 80 % класса мельче 4 мкм и 60 % мельче 2 мкм, чего не получалось без устройства. Таким образом устройство ЭКОФОР, нейтрализующее электрический заряд измельчаемого материала, позволяет достигнуть сверхтонкого измельчения химически осажденного мела.

2. Помол гранулированной серы. Исходный материал – сера гранулированная (ТУ 2112-016-00148599–01) и белая сажа БС-100 (ГОСТ 18307), как интенсификатор.

Таблица 3

Результаты помола серы гранулированной

Номер пробы	Масса загрузки материала, кг	Продолжительность помола, мин	Содержание фракции, %	
			160 мкм	71 мкм
Серия 1 без ЭКОФОР, содержание белой сажи 0,2%, помол не происходил из-за налипания материала на мелющие тела				
Серия 2 с ЭКОФОР, содержание белой сажи 0,2 %				
1,0	3,60	0	100	100
1,1	3,60	2	23,2	54,6
1,2	3,53	4	3,65	27,9
1,3	3,46	6	0,15	14,3
1,4	3,39	10	следы (агрегаты)	8,8
Серия 3 без ЭКОФОР, содержание белой сажи 0,5 %				
3,0	3,00	0	100	100
3,1	2,93	5	0,2	26,5
3,2	2,86	10	0,5	16
Серия 4 с ЭКОФОР, содержание белой сажи 0,5 %				
2,0	3,00	0	100	100
2,1	2,93	5	0,15	19
2,2	2,86	10	0,2	9,8

Помол производился на лабораторной вибрационной мельнице СВМ-3 с мелющими телами в виде стальных цилиндров 15×15 мм, масса загрузки мелющих тел 36 кг.

Испытания показали, что требуемое качество помола гранулированной серы 9,7 % на сите 71 мкм при добавке белой сажи 0,2 и 0,5 % без подключения устройства ЭКОФОР были не удовлетворительны. При 0,2 % помол не происходил из-за налипания на мелющие тела. При использовании устройства ЭКОФОР помол при подаче белой са-

жи 0,2 % удовлетворял требованиям, а подача ее в количестве 0,5 % являлась избыточной.

Достижение удельной поверхности уровня 3485 см²/г при помоле без устройства происходило с агрегацией материала, а с устройством даже на уровне 4785 см²/г агрегация не наблюдалась. При продолжительности помола 30 мин увеличение удельной поверхности при помоле с устройством составило 775 см/г, что свидетельствовало не только о повышении качества помола, но и о возможном значительном увеличении производительности мельницы с получением более качественного порошка.

3. *Помол кокса непрокаленного.* Исходный материал – кокс непрокаленный. Помол производился на лабораторной вибромельнице СВМ-3 с мелющими шарами диаметром 10–20 мм. Масса загрузки мелющих тел составляла 36 кг.

Таблица 4

Результаты помола кокса непрокаленного

Номер пробы	Масса загрузки материала, кг	Продолжительность помола, мин	Содержание фракции +63 мкм, %
Серия 1 без ЭКОФОР			
1.0	1.95	0	93,9
1.1	1,95	2,5	40,2
1.2	1,91	5	19,9
1.3	1,87	10	6,6
1.4	1.83	20	1,5
Серия 2 с ЭКОФОР			
2.0	2	0	93,9
2.1	2	5	16,5
2.2	1,96	10	2,8
2.3	1.92	20	0,1

При продолжительности помола непрокаленного кокса 10 мин улучшение остатка на сите 63 мкм, с использованием устройства составило 2,8 %, что свидетельствовало о возможности увеличения производительности мельницы.

Заключение

Анализ негативных проявлений электризации при сухом измельчении твердых, неоднородных, природных и техногенных материалов подтвердил правомочность предложенного выделения электростатической составляющей сопротивления материала измельчению. Интенсификация измельчения в таком случае целенаправленно проводится пу-

тем уменьшения этой составляющей за счет упреждающей нейтрализации активированных электроносителей в измельчаемом материале. В результате уменьшаются и потери упругой энергии деформации, шедшие ранее на электризацию. Более эффективное использование упругой энергии деформации приводит к интенсификации измельчения.

Исследованы возможности разработанного с этой целью активного электронейтрализатора, оказывающего текущее воздействие на металлическую поверхность рабочих тел и способствующего полигонизации их дислокационного «дебри-слоя». Аннигиляцией дислокаций создавались предпочтительные условия для релаксации электрического заряда, предваряющие его негативное воздействие на процесс измельчения. В результате снижение удельного расхода энергии при измельчении составило 3–7 кВт·ч на 1 т готового продукта, что соответствует экономии от 150 до 900 кВт·ч за каждый час работы системы измельчения из расчета на один активный электронейтрализатор.

Разработаны методики использования новой технологии на конусных дробилках, шаровых и вибрационных мельницах и валковых измельчителях при переработке различных твердых материалов. Выявлены пути совместного использования аппаратной электронейтрализации и интенсификаторов помола, реализующих эффект академика П.А. Ребиндера.

Список литературы

1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
2. Дерябин Б.Е., Чураев Н.В. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
3. Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гулин В.С. Теория цемента. – Киев: Будивельник, 1991. – 168 с.
4. Дерябин Б.Е., Кротова И.А., Муллер Е.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
5. Устройство для наложения техно-физических воздействий на структурируемые технологические переделы: пат. № 2100492 РФ / Н.Ф. Глухарев, Г.К. Ивахнюк, В.Г. Левинсон, А.О. Шевченко, Е.А. Штабной. – Опубл. 25.10.1995.
6. Глухарев Н.Ф. Способ измельчения неэлектропроводного материала, цемент или добавка, полученные этим способом, а также способ повышения износостойкости мелющих тел и способ повышения текучести продукта с использованием способа измельчения: пат. 2410159 РФ. – Опубл. 29.10.2009.

7. Файте Ф. Цементная промышленность сегодня и завтра – тенденции и рассуждения о цементном заводе будущего // Цемент и его применение. – 2001. – № 1. – С. 6–12.

8. Гольфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. – СПб.; М.; Краснодар, 2003. – 674 с.

9. Осестьян Ю.А. Взаимодействие электронов с дислокациями. – Вестник РАН. – 2006. – Т.76, № 10. – С. 899–908.

10. Сальников А.Н., Гестрин С.Г. Заряженные дислокации и точечные дефекты в кристаллах (аналитические модели взаимодействия). – Саратов: Изд-во СГТУ, 2002. – 224 с.

References

1. Rebinder P.A. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh [Surface phenomena in disperse systems]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannye trudy*. Moscow: Nauka, 1979. 384 p.

2. Deryabin B.E., Churaev N.V. Poverkhnostnye sily [Surface forces]. Moscow: Nauka, 1985. 398 p.

3. Pashchenko A.A., Myasnikova E.A., Gulin V.S. Teoriya tsementa [Theory of cement]. Kiev: Budivelnik, 1991. 168 p.

4. Deryabin B.E., Krotova I.A., Muller E.M. Poverkhnostnye sily [Surface forces]. Moscow: Nauka, 1985. 398 p.

5. Glukharev N.F., Ivakhnyuk G.K., Levinson V.G., Shevchenko A.O., Shtabnoj E.A. Ustrojstvo dlya nalozheniya tekhnofizicheskikh vozdeystvij na strukturiruemye tekhnologicheskie peredely [The device for applying techno-physical effects on structured technological conversion]. Patent no. 2100492 RF. 1995.

6. Glukharev N.F. Sposob izmelcheniya neelektroprovodnogo materiala, tsement ili dobavka, poluchennye etim sposobom, a takzhe sposob povysheniya iznosostoykosti melyushchikh tel i sposob povysheniya tekuchesti produkta s ispolzovaniem sposoba izmelcheniya [A method of grinding a conductive material or a cement additive produced by this method, and a method for improving the wear resistance of grinding bodies and a method of increasing the yield of the product using the grinding method]. Patent no. 2410159 RF. 2009.

7. Fajte F. Tsementnaya promyshlennost segodnya i zavtra – tendentsii i rassuzhdeniya o tsementnom zavode budushchego [The cement industry today and tomorrow – tendencies and discussions about the future of the cement plant]. *Tsement i ego primeneniye*, 2001, no. 1, pp. 6–12.

8. Golfman M.I., Kovalevich O.V., Yustratov V.P. Kolloidnaya khimiya [Colloid chemistry]. Saint Petersburg; Moscow; Krasnodar, 2003. 674 p.

9. Osepyan J.A. Vzaimodejstvie elektronov s dislokatsiyami [The interaction of electrons with dislocations]. *Vestnik RAN*, 2006, Vol. 76, no. 10, pp. 899–908.

10. Salnikov A.N., Gestrin S.G. Zaryazhennye dislokatsii i tochechnye defekty v kristallakh (analiticheskie modeli vzaimodejstviya) [Charged dislocations and point defects in crystals (analytical models of interaction)]. Saratov, 2002. 224 p.

Получено 14.03.2016

Об авторах

Олонцев Валентин Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: olontsevfv@gmail.com).

Минькова Анфиса Андреевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: minkova20@gmail.com).

Виталий Иванович Митин (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: mitinvi@mail.ru).

About the authors

Valentin F. Olontsev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: olontsevfv@gmail.com).

Anfisa A. Minkova (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Materials and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: minkova20@gmail.com).

Vitaliy I. Mitin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials and Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mitinvi@mail.ru).