

УДК 669.21/.23(075.8)

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ РУДЫ НА ПАРАМЕТРЫ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

© 2014 г. **А.И. Карпухин, А.В. Аксенов, Р.А. Яковлев**

Национальный исследовательский Иркутский государственный
технический университет (ИрГТУ)

Статья поступила в редакцию 24.11.12 г., доработана 29.07.13 г., подписана в печать 10.11.13 г.

Рассмотрены основные проблемы интенсификации процессов кучного выщелачивания и определено перспективное направление совершенствования данного метода извлечения золота из золотосодержащих руд. Предложено использовать в цикле измельчения валковые дробилки высокого давления. Представлено описание выполняемых тестов по моделированию измельчения руды в этих аппаратах. Результаты исследований показали перспективность данного метода разрушения материала – повышение уровня извлечения золота в раствор составило более 5 %.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, золото, дробление, разупрочнение, измельчение, давление, валки, исследование, вещественный состав, извлечение, технология, тесты, моделирование, проницаемость, трещиноватость, разрушение.

There were examined issues of intensification of heap leaching processes and was defined promising direction of upgrading of given method of gold recovery from gold ores. There was offered use in cycle of degradation high pressure grinding rollers. There was presented description of completed tests on simulation of ore stump in these devices. Results of study demonstrated prospectivity of given method of material breakage – upgrade of gold recovery into solution was more than 5 %.

Keywords: heap leaching, gold, breakage, softening, degradation, pressure, rolls, study, composition, recovery, technology, tests, modeling, permeability, fracturing, breakage.

Снижение технологических и экономических показателей переработки золотосодержащих руд различных месторождений по традиционным схемам прежде всего связано не только с уменьшением запасов сырья, но и в значительной степени с ухудшением качества перерабатываемой руды, а также повышением эксплуатационных расходов в переделе рудоподготовки. Технология переработки золотосодержащих руд методом кучного выщелачивания исследована достаточно глубоко, однако существуют и малоизученные направления повышения эффективности данного метода.

В общем основные пути интенсификации процессов кучного выщелачивания можно разделить на следующие категории:

1) изучение и разработка новых, экономически дешевых (относительно традиционных) методов рудоподготовки;

2) поиск и исследование новых или модернизированных способов укладки рудного штабеля;

3) подбор новых реагентов, повышающих уровень извлечения благородных металлов;

4) создание совершенных технологий регулирования процессов, в частности полный автоматизированный контроль всех переделов технологической схемы [1].

Цель рудоподготовки — получить частицы руды такой крупности, при которой обеспечивается контакт цианидного раствора с поверхностью металла при сохранении устойчивости штабеля руды и высокой фильтрующей способности. В основном, в зависимости от физико-механических свойств исходной руды и требуемых технологических параметров кучного выщелачивания, используют дробление в 2–3 стадии. Одним из перспективных направлений совершенствования кучного выщелачивания является уменьшение крупности (до классов –10–3 мм и менее) перерабатываемого материала, что позволяет интенсифицировать процесс извлечения золота

Карпухин А.И. – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии и цветных металлов ИрГТУ (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83). E-mail: a_karpuhin46@list.ru.

Аксенов А.В. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: aksenov2008@yandex.ru.

Яковлев Р.А. – аспирант той же кафедры. E-mail: ruslan_yakovlev@inbox.ru.

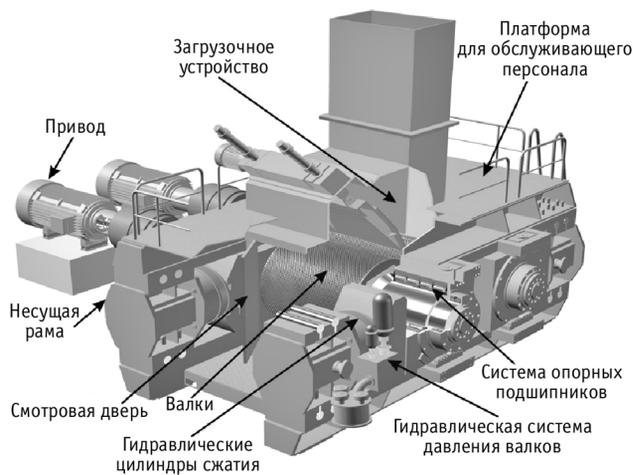


Рис. 1. Измельчающие валки высокого давления

[2, 3]. При этом предлагается использовать в цикле измельчения валковые дробилки высокого давления. Часто их называют «измельчающими валками высокого давления» (ИВВД, или HPGR — от англ. High Pressure Grinding Rolls). Основные узлы этой установки представлены на рис. 1.

Перечень рудных обогатительных фабрик, успешно применяющих ИВВД, насчитывает уже десятков предприятий, в число которых входит ЗИФ Су-

хой Лог (Россия). Пять крупных фабрик — золоторудная Boddington, Австралия (производительностью 35 млн т/год), медная «Михеевская», Россия (25 млн т/год), молибденовая Ruby Creek, Канада (7 млн т/год), медная Cerro Verde, Перу (39,4 млн т/год) [4] и медно-молибденовая Spinifex Ridge, Австралия (20 млн т/год) — проектируются с учетом использования ИВВД. Ключевым фактором, определяющим предпочтительность их применения, кроме значительного снижения энергозатрат является высокая пропускная способность, сравнимая с производительностью самых крупных мельниц полусамоизмельчения. Стоит отметить, что 2 работающие в СНГ фабрики (Васильковский ГОК и Нурказган, Республика Казахстан) также успешно эксплуатируют данные агрегаты на стадии рудо-подготовки.

В дробилках данного типа используется принцип дробления при максимальном заполнении пространства между валками, при этом происходят селективное разрушение материала, увеличение трещиноватости продукта дробления (рис. 2), что, в свою очередь, способствует повышению проницаемости руды, скорости и извлечению металлов при выщелачивании [5]. Разрушение руды происходит за

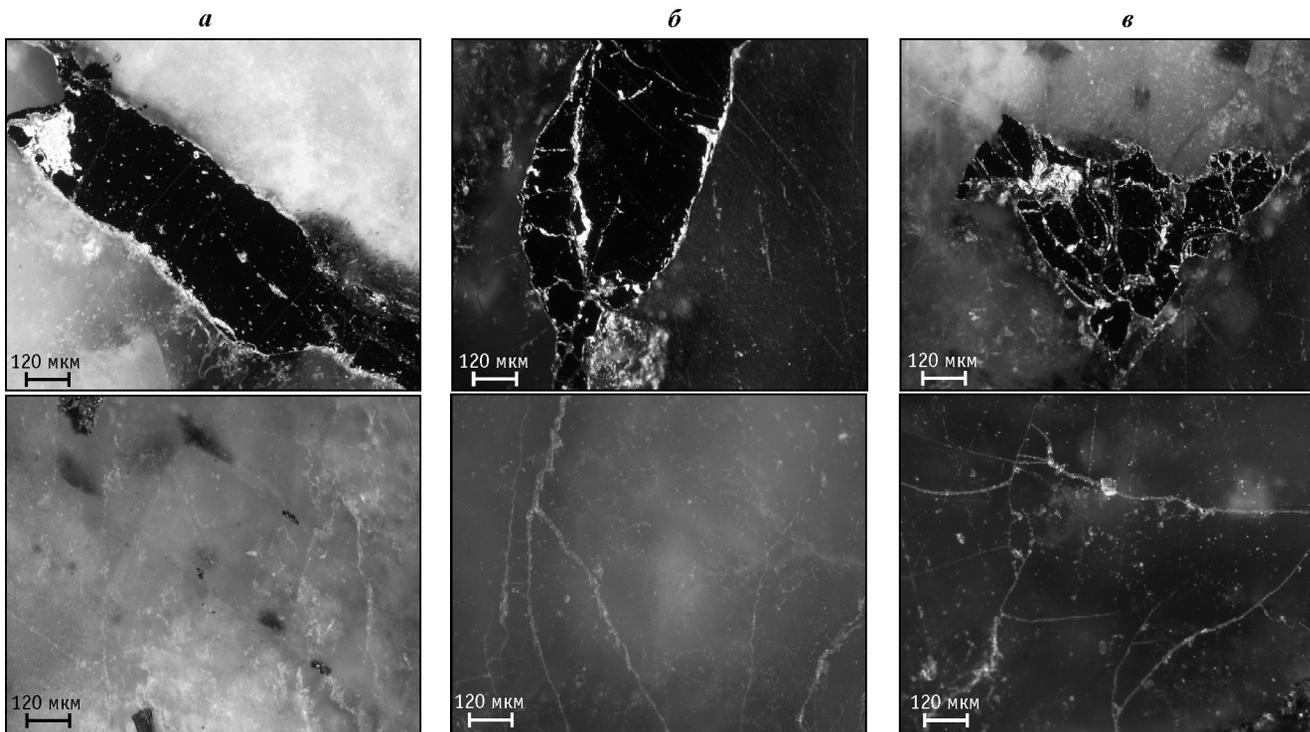


Рис. 2. Фотографии измельченных продуктов

а — руда после дробления в щековой дробилке; **б** — руда, разрушенная на промышленной установке ИВВД; **в** — руда, измельченная в лабораторной установке, имитирующей ИВВД

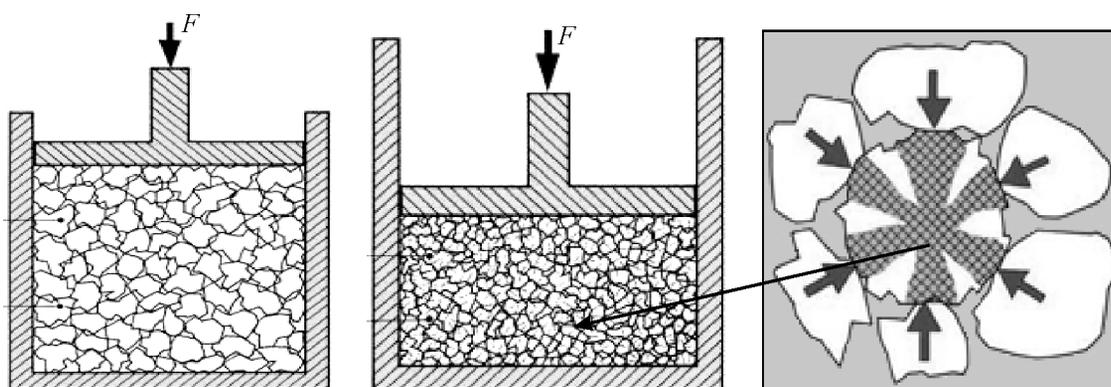


Рис. 3. Принцип разрушения материала в межчастичном слое

счет сжатия материала в межчастичном слое. Условно эту картину иллюстрирует рис. 3.

Применение данных агрегатов позволяет сократить расходы связующего при окомковании руды и получить более стабильные при капельном орошении цианистыми растворами окатыши. С уменьшением крупности выщелачиваемого материала увеличивается свободная поверхность реакции и, как следствие, доступность рудного материала для цианида, а значит, и повышается интенсивность извлечения золота.

Существуют несколько основных методов дробления материала в валках высокого давления: дробление за один или более циклов с последующим грохочением и как предварительное дробление перед измельчением в шаровых мельницах [6]. Каждый способ применяется в различных схемах цепей аппаратов в зависимости от технологических свойств минерального сырья и целей дальнейшей его переработки. В некоторых случаях для труднопросачивающихся руд требуется дробление материала до крупности -2 мм, но организовать такую схему рудоподготовки с помощью традиционного оборудования достаточно сложно.

Применение измельчающих валков высокого давления в данном случае имеет неоспоримые преимущества. Во-первых, в отличие от обычных дробилок данные агрегаты производят значительные объемы мелких фракций (30–40 % фр. -90 мкм), при этом можно получить уже готовый класс -2 мм. Во-вторых, путем использования ИВВД можно частично или полностью отказаться от третьей стадии дробления. При этом эффективность извлечения золота повысится на 8–10 % за счет увеличения трещиноватости и проницаемости материала. Традиционное дробление даже в современных аппаратах позволяет производить сухое дробление до мини-

мальной крупности -7 мм. Применение же ИВВД делает возможным разрушение руды до крупности 80 % фр. -3 мм, а за счет трещиноватости и разупрочнения обрабатываемого материала высоким давлением она будет соответствовать -1 мм в сравнении с обычным дроблением [7].

В настоящее время осуществляются лабораторные исследования процессов, протекающих в измельчающих валках высокого давления. Для этого с отделения рудоподготовки горно-обогатительного комбината (Респ. Казахстан) отобраны пробы исходных руд до и после измельчения в ИВВД. На данных образцах определялся вещественный состав и проведены тесты по моделированию разрушения исходных руд в ИВВД. В ходе экспериментов представленные пробы материала до ИВВД разрушались в специальной установке, имитирующей разупрочнение руды, в лабораторных условиях. При этом давление составляло $10-15$ Н/мм², что соответствует промышленным показателям.

Измельченные пробы изучались методами гранулометрического и микроскопического анализов и направлялись на установку кучного выщелачивания. Для сравнения показателей при выщелачивании исследуемых образцов проводили тесты на исходной руде, включающие ее дробление традиционными методами (шековая дробилка); гранулометрический и микроскопический анализы; кучное выщелачивание. Исходя из предварительного вещественного анализа исходной пробы руды данного месторождения можно сделать вывод о том, что она является упорной для переработки методом кучного выщелачивания.

В табл. 1 представлен гранулометрический состав образцов исходной руды и дробленной в щековой дробилке и в промышленной установке ИВВД, а также пробы, разрушенной в лабораторной установке, имитирующей ИВВД.

Таблица 1
Гранулометрический состав исследуемого материала

Класс крупности, мм	Исходная проба руды				Продукт лабораторной щековой дробилки			
	Выход класса, %	Σ выход класса, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Выход класса, %	Σ выход класса, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
–40+30	16,55	100,00	1,81	12,88	–	–	–	–
–30+20	24,10	83,45	1,67	17,35	–	–	–	–
–20+15	14,71	59,35	2,75	17,44	–	–	–	–
–15+10	13,96	44,64	2,60	15,65	8,67	100,00	3,30	13,63
–10+8	5,16	30,68	3,20	7,12	10,51	91,33	1,54	7,70
–8+5	8,57	25,51	1,92	7,07	21,06	80,82	1,67	16,74
–5+2	7,41	16,95	1,90	6,06	21,08	59,76	1,67	16,76
–2+1	2,86	9,53	2,10	2,59	11,86	38,68	1,65	9,31
–1+0,5	1,61	6,68	2,80	1,94	8,41	26,83	2,50	10,02
–0,5+0,2	1,69	5,07	3,45	2,51	7,44	18,42	2,80	9,92
–0,2+0,1	0,64	3,38	3,45	0,96	4,16	10,97	2,50	4,95
–0,1+0,071	0,31	2,73	3,45	0,45	1,59	6,81	2,85	2,16
–0,071+0,045	0,36	2,43	6,00	0,93	1,07	5,22	4,10	2,08
–0,045	2,07	2,07	7,90	7,04	4,15	4,15	3,40	6,72
Итого	100,0	–	2,32	100,0	100,0	–	2,10	100,00
Класс крупности, мм	Промышленная установка ИВВД				Лабораторная установка ИВВД			
	Выход класса, %	Σ выход класса, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Выход класса, %	Σ выход класса, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
–40+30	0,52	100,00	2,30	0,58	1,26	100,00	2,80	1,69
–30+20	3,02	99,48	0,72	1,06	4,43	98,74	2,15	4,56
–20+15	5,11	96,46	1,93	4,83	2,46	94,32	2,35	2,77
–15+10	6,62	91,35	2,20	7,13	4,47	91,86	1,31	2,80
–10+8	3,52	84,73	1,70	2,92	2,78	87,39	2,10	2,80
–8+5	7,96	81,21	2,08	8,11	11,66	84,61	1,84	10,26
–5+2	15,33	73,24	1,65	12,35	19,32	72,95	1,83	16,96
–2+1	8,81	57,92	1,83	7,90	14,18	53,62	1,90	12,92
–1+0,5	10,87	49,10	1,92	10,20	10,78	39,45	1,91	9,87
–0,5+0,2	11,24	38,23	2,30	12,66	12,66	28,67	2,30	13,97
–0,2+0,1	6,33	26,99	2,25	6,97	4,09	16,01	2,55	5,00
–0,1+0,071	2,58	20,67	2,20	2,78	1,66	11,92	2,40	1,91
–0,071+0,045	3,08	18,08	2,25	3,39	2,04	10,27	2,90	2,84
–0,045	15,01	15,01	2,60	19,11	8,22	8,22	2,95	11,64
Итого	100,0	–	2,04	100,0	100,0	–	2,08	100,00

Проведенными исследованиями по выщелачиванию разрушенной различными способами руды (табл. 2, рис. 4) установлено, что извлечение золота в раствор образцов материала после измельче-

ния валками высокого давления в промышленных и лабораторных условиях (моделирующих ИВВД) находится на одном уровне — 36,05 и 36,17 % соответственно. Для пробы исходной руды, дробленной

Таблица 2

Результаты выщелачивания руды, измельченной разными способами, в 1,5-метровых колоннах

№ теста	Метод измельчения	Содержание Au, г/т		Извлечение Au в раствор, %	Расход реагента, кг/т руды		
		Исх. проба *	Кек		NaCN		NaOH
					Окомкование	Выщелачивание	
1	Лабораторная щековая дробилка	2,01	1,40	30,26	0,03	0,20	0,3
2		2,03	1,38	32,03	0,03	0,22	0,3
3	Промышленная установка ИВВД	2,11	1,37	35,33	0,04	0,22	0,3
4		2,06	1,30	36,92	0,04	0,22	0,3
5	Лабораторная установка ИВВД	2,04	1,30	36,41	0,04	0,22	0,3
6		2,01	1,28	36,07	0,04	0,22	0,3

* Содержание золота в исходных пробах руды рассчитано по балансу тестов.

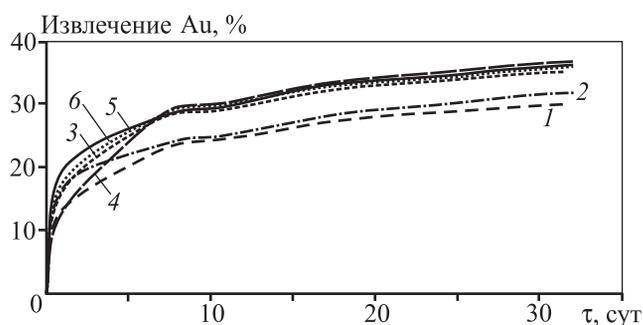


Рис. 4. Зависимость извлечения золота в раствор от продолжительности выщелачивания
Цифры у кривых соответствуют № тестов (см. табл. 2)

в щековой дробилке, этот показатель составляет в среднем 31,07 %.

Результаты проведенных экспериментов показали перспективность данного метода разрушения материала (повышение уровня извлечения золота в раствор составило более 5 %), а также дали представление о том, насколько точно моделируется процесс измельчения в лабораторных условиях — по уровню извлечения металла получены достаточно корректные данные, а по гранулометрическому составу имеются значительные расхождения.

Таким образом, применение разрушения в измельчающих валках высокого давления может не только сократить число стадий дробления, снизить энергозатраты на рудоподготовку, но и фактически определить выбор технологии переработки руды в целом. Так, переход предприятия, использующего метод кучного выщелачивания руды, на сырье другого типа (смена окисленной руды на смешанную или первичную) в большинстве случаев обуслови-

вает необходимость строительства обогатительной фабрики или делает проект нерентабельным. Применение измельчающих валков высокого давления в некоторых случаях может не только продлить период эксплуатации установки кучного выщелачивания, но и сохранить данную технологию для других типов руд месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извлечение золота в процессе кучного выщелачивания золотосодержащих руд в большей степени определяется доступом растворителя к поверхности благородного металла. Для того чтобы повысить проницаемость исходной руды, ее дробят, т.е. увеличивают поверхность взаимодействия металла с комплексообразователем. Кроме этого, при разрушении руды в валках высокого давления повышается трещиноватость дробленого материала, что, в свою очередь, существенно улучшает проницаемость рудного штабеля при кучном выщелачивании за счет более полного раскрытия материала.

Все перечисленные показатели положительно скажутся на скорости выщелачивания золота в сторону ее увеличения и позволят повысить уровень извлечения в целом. А так как при получении золота из минеральных руд методом кучного выщелачивания повышение степени извлечения даже на несколько процентов приведет к высокому экономическому эффекту в сочетании с низкими удельными и капитальными затратами по установке и эксплуатации измельчающих валков высокого давления (по сравнению с традиционными

агрегатами дробления и измельчения), можно рассматривать данную технологию как высокоперспективную.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев В.Е., Дружина Г.Я., Гудков С.С. Кучное выщелачивание золота и серебра. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2004.
2. Минеев Г.Г., Леонов С.Б. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд. Иркутск: ИрГТУ, 1997.
3. Леонов С.Б., Минеев Г.Г., Жучков И.А. Гидрометаллургия. Рудоподготовка и выщелачивание. Иркутск: ИрГТУ, 1998.
4. Vanderbeek J.L. HGPR Implementation Cerro Verde. SAG 2006, Canada, Vancouver, 2006.
5. Фазлуллин М.И. Кучное выщелачивание благородных металлов. М.: Академия горных наук, 2001.
6. Федотов П.К. Межчастичное разрушение руды. М.: Геоинформмарк, 2011.
7. Mayerhauser D. // Ceramic Forum Inter. 1990. Vol. 67, № 7/8. P. 335–341.

УДК 669.715.541.127

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА АК7М2 + 0,05%Sr, ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЕМ

© 2014 г. А.Э. Бердиев, И.Н. Ганиев, С.С. Гулов

Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, г. Душанбе
Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе

Статья поступила в редакцию 29.03.13 г., доработана 03.05.13 г., подписана в печать 16.05.13 г.

Термогравиметрическим методом исследована кинетика окисления твердого сплава АК7М2 + 0,05%Sr, легированного германием, в атмосфере воздуха при температурах 773, 798 и 823 К. Выявлено, что добавки до 0,05 мас.% Ge уменьшают скорость окисления, о чем свидетельствует увеличение величины кажущейся энергии активации процесса окисления от 14,7 до 79,8 кДж/моль, которая с повышением содержания Ge до 1,0 мас.% снова падает до 25,2 кДж/моль. Величина истинной скорости окисления меняется в пределах $(4,30 \pm 6,00) \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с) в зависимости от количества легирующего компонента. В продуктах окисления сплавов наряду с γ -Al₂O₃ также обнаружены фазы SiO₂ и GeO₂.

Ключевые слова: сплав АК7М2, стронций, германий, термогравиметрический метод, кинетика окисления, температурная зависимость, истинная скорость окисления, энергия активации.

There was investigated by means of thermogravimetric method kinetics of oxidation of cutting alloy AK7M2 + 0,05%Sr, germanium alloyed, in air at temperature 773, 798 and 823 K. There was identified that additives until 0,05 wt.% Ge will be reduced oxidation rate, as evidenced by increasing of value of apparent activation energy of oxidation process from 14,7 to 79,8 kJ/mol, which with increasing of Ge content until 1,0 wt.% again decreased to 25,2 kJ/mol. The value of actual velocity of oxidation is changed in the range $(4,30 \pm 6,00) \cdot 10^{-4}$ kg/(m²·c) depending on quantity of alloying component. In products of alloys oxidation together with γ -Al₂O₃ looked up phases SiO₂ and GeO₂.

Keywords: alloy AK7M2, strontium, germanium, thermogravimetric method, kinetics of oxidation, temperature dependence, true oxidation rate, activation energy.

Бердиев А.Э. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории коррозионно-стойких материалов Института химии (734063, Респ. Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2). E-mail: berdiev75@mail.ru.

Ганиев И.Н. – докт. хим. наук, проф., акад. АН Респ. Таджикистан, зав. той же лабораторией. E-mail: ganiev48@mail.ru.

Гулов С.С. – доцент кафедры материаловедения, металлургических машин и оборудования Таджикского технического ун-та (734042, Респ. Таджикистан, г. Душанбе, пр-т Акад. Раджабова, 10а). E-mail: gulov72@mail.ru.