

## **КОНТРОЛЬ ЭНЕРГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И МЕХАНОАКТИВАЦИИ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ АГО-3**

М. П. Бороненко, В. В. Лавриков, А. Е. Серегин, П. А. Юрукин, Р. Ф. Юхимук

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-42-00106.

### **Введение**

В технологических процессах порошковой металлургии широко используются методы механоактивации (МА) и последующей сфероидизацией в пот плазменном потоке [1–4]. С их помощью получают металлические твёрдые и сверхтвёрдые растворы и химические соединения в процессе МА смеси порошков в планетарных шаровых или вибрационных мельницах [5–7]. МА в высокоэнергонагруженных аппаратах позволяет осуществлять измельчение порошков в трех комбинированных режимах – ударном, ударно-стирающем или истирающем режимах [8–10], что приводит к накоплению структурных дефектов, увеличению дисперсности, увеличению активной поверхности веществ, фазовым превращениям, аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность [11–14].

Процессы, протекающие при МА, в частности механосинтез (МС), относятся к неравновесным фазовым превращениям [15, 16] и, согласно исследованиям [17], могут иметь место уже при температурах, близких комнатным. Атомное перераспределение по механизму нормальной диффузии, в сплавах на основе Fe при таких температурах отсутствует [18–19]. Однако в результате интенсивной холодной пластической деформации формируются точечные дефекты, и становится возможным деформационно-индуцированный массоперенос – диффузия атомов на расстояния, значительно превышающие межатомные, вследствие чего нарушается структура металлов, происходит ее аморфизация [20]. Процесс механоактивации содержит в себе два конкурирующих процесса – процесс образования дефектов и процесс их релаксации. Последний может продолжаться от долей секунды до нескольких лет [21, 22]. Механоактивация вещества эффективно продолжается до тех пор, пока скорость образования дефектов превышает скорость их релаксации [23, 24].

Сильное деформационное импульсное воздействие на вещество, особенно при низких температурах, сопровождается передачей ему большой энергии и формированием особых, локально неоднородных состояний, обусловленных насыщением дефектами и высокими напряжениями на малых субмикро- и наномасштабных элементах структуры [25, 26]. Вне зависимости от аппаратного оформления процесса результаты всякой механической обработки можно представить в самом общем виде как некоторое сочетание трехосного нагружения и сдвиговой деформации на контактах между частицами твердого вещества [27, 28]. Отличие между обработкой в различных аппаратах сводится не только к количественному отличию в скорости этих процессов и количестве подводимой к твердому телу энергии, но и к качественному различию получаемых результатов. Например, полученные результаты формирования аморфизированного покрытия нитрида и оксида титана на стальной поверхности мелющих тел в ходе МА в планетарной мельнице АГО-3 являются недостижимыми для меньших активаторов [29].

К сожалению, экспериментальных работ по непосредственным измерениям характеристик процессов МА в планетарных мельницах (температуры, скорости мелющих тел, энергонапряженности) значительно меньше, чем расчетных. Хорошо изученными являются планетарные механоактиваторы немецкой компании Fritsch (например Fritsch Pulverisette 5) и российской компании НОВИЦ (г. Новосибирск) АГО-2. Параметры энергонапряженности в зависимости от параметров загрузки, активного ускорения, зависимости температуры мелющих тел от времени МА для лабораторного активатора АГО-3 не определены.

### Исследование основных управляющих характеристик

Характеристики механообработки с разных сторон описывают процесс механоактивации, протекающий при определенном наборе управляемых параметров и зависят от свойств обрабатываемого материала [30–32]. К самым важным управляющим параметрам для планетарной мельницы относятся: скорость вращения водила, материал и размеры мелющих тел, их масса и средняя скорость между соударениями; отношение объема мелющих тел и обрабатываемого порошка, степень заполнения контейнера. В ходе эксперимента определены характеристики активатора в зависимости от управляемых параметров.

*Оборудование и методика эксперимента:*

Механоактиватор АГО-3 (см. рис. 1) производства компании НОВИЦ (г. Новосибирск).

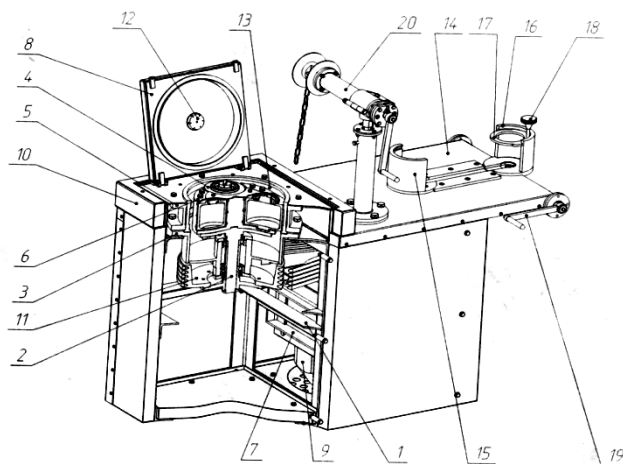


Рисунок 1 – Внешний вид и устройство механоактиватора АГО-3

1 – каркас, 2 – водило, 3 – стойка, 4 – контейнер, 5 – корпус, 6 – обойма, 7 – подвижный кронштейн, 8 – крышка, 9 – электродвигатель, 10 – кожух, 11 – шкиф, 12 – распылитель, 13 – гильза, 14 – стол, 15 – направляющая, 16, 17 – фиксаторы, 18 – ручка, 19 – рукоять, 20 – подъемник

Таблица 1

#### Технические параметры АГО-3

|   |                |
|---|----------------|
| Режим работы  | дискретный     |
| Максимальный исходный размер частиц материала, мм                     | 3...5          |
| Размер частиц на выходе, мкм  | 0.5–3          |
| Количество и объем барабанов, мл                                      | 3*2000         |
| Мелющие тела  | шары           |
| Диаметр мелющих тел, мм   | 6...10         |
| Максимальная загрузка контейнера мелющими телами, гр.                 | 3000           |
| Максимальная загрузка контейнера измельчаемым материалом, гр          | 300            |
| Охлаждающая жидкость, расход ОЖ                                       | Вода, 60 л/мин |
| Частота вращения барабанов в переносном движении, об./мин             | 1780           |
| Центробежное ускорение, развиваемое мелющими телами, м/с <sup>2</sup> | 800            |
| Мощность электродвигателя, кВт  | 30             |
| Габаритные размеры (длина/ширина/высота), мм                          | 1212/575/1080  |
| Передаточное отношение клиноременной передачи                         | 2              |
| Масса, кг   | 350            |

Система управления двигателем активатора реализована посредством высокочастотного контроллера Siemens Sinamics G120 (производство Германия) (см. рис. 2). Управление кон-

троллером осуществляется свободно распространяемым ПО Siemens STARTER. Контроллер оборудован 8 АЦП, позволяющими диагностировать до 8 из 20 предустановленных (выборных) параметров работы двигателя с временным разрешением не менее 5 мс. В ходе эксперимента детектировались следующие параметры (временное разрешение составляет 40 мс):

- Активная мощность, кВт;
- Крутящий момент двигателя, Нм;
- Сила тока, А;
- Напряжение, В;
- Частота вращения вала двигателя, Гц;
- Температура двигателя, 0С;
- Коэффициент проскальзывания.


|   |                                 |   |
|---|---------------------------------|---|
|  | Диапазон напряжений и мощностей | 380–690 В, ± 10 %, 3 АС, 37 кВт   |
|   | Тип управления                  | Векторное управление с энкодером и без энкодера, управление по потокосцеплению (FCC), скалярное управление U/f, квадратичная U/f характеристика, параметрируемая U/f характеристика |
|   | Входы                           | 10 цифровых входов, 4 аналоговых входа  |
|   | Выходы                          | 4 цифровых выхода, 2 аналоговых выхода  |

Рисунок 2 – Внешний вид и технические характеристики высокочастотного контроллера Siemens Sinamics G120

Мелющие тела: шары, изготовленные из стали ШХ18. Масса тел определена на весах Vibra AJ-2200CE, погрешность измерения массы составляет ±0,01 гр. Измерение диаметра производилось микрометром, (погрешность измерения ±10 мкм) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях полученные значения усреднялись. Распределение массы и габаритных размеров мелющих тел представлены на рисунке 3.

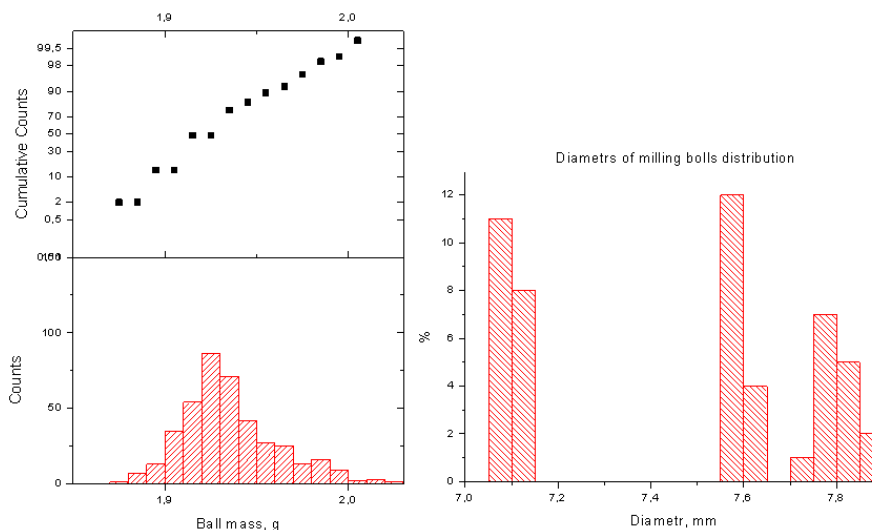


Рисунок 3 – Распределение массы и габаритных размеров мелющих тел

Измерение температуры производилось контактным термометром ТК-5.09 (см. рис. 3), оборудованным термопарой ЗВ9-500. Диапазон работы термометра – 99–1800 0С. Погрешность измерения – ±10С.



Рисунок 4 – Внешний вид и устройство термометра термометром ТК-5.09

Изменяемыми параметрами эксперимента являлись:

- Частота вращения двигателя, об/мин – 260, 460, 660, 860, 1060, 1260, 1460;
- Масса загружаемых мелющих тел, гр: 1000, 1700, 2400, 3000 гр;
- Время МА, сек: 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540.

Для определения внутренних потерь на жидкостное трение, гидросопротивление вращению с помощью высокочастотного контроллера производилось измерение параметров активной мощности двигателя, частоты вращения, крутящего момента.

*Методика эксперимента и анализ полученных данных:*

Нами были сняты температурные характеристики мельницы и проведена серия опытов, направленная на изучение управляющих параметров, заключающаяся в нахождении и анализе зависимости температуры мелющих тел от времени механоактивации, числа оборотов в минуту и загрузки барабана планетарной мельницы (рис. 5, рис. 6, рис. 7, рис. 8).

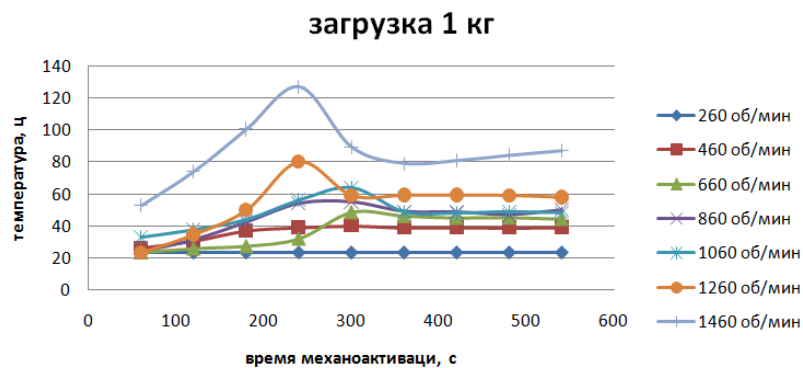


Рисунок 5 – Зависимость температуры мелющих тел от времени механоактивации, числа оборотов в минуту и загрузки (1 кг) барабана планетарной мельницы

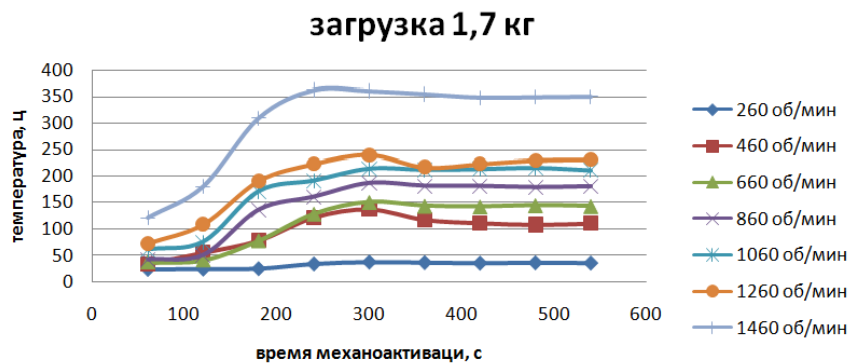


Рисунок 6 – Зависимость температуры мелющих тел от времени механоактивации, числа оборотов в минуту и загрузки (1,7 кг) барабана планетарной мельницы

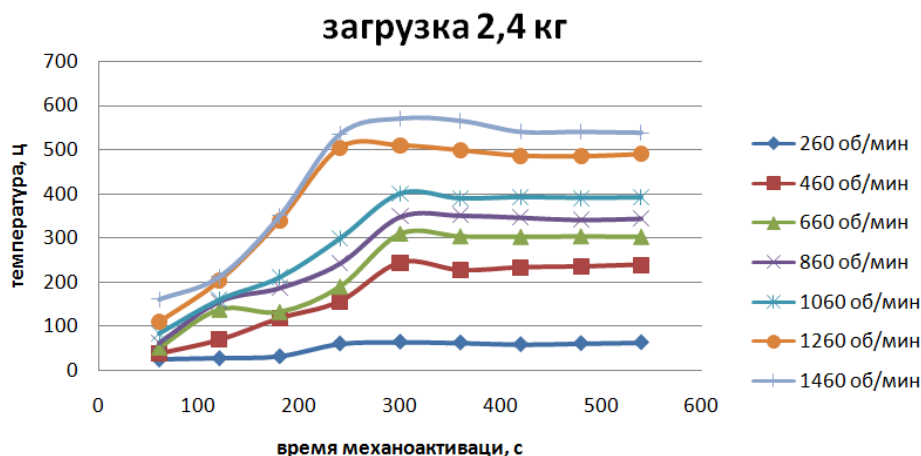


Рисунок 7 – Зависимость температуры мелющих тел от времени механоактивации, числа оборотов в минуту и загрузки (2,4 кг) барабана планетарной мельницы

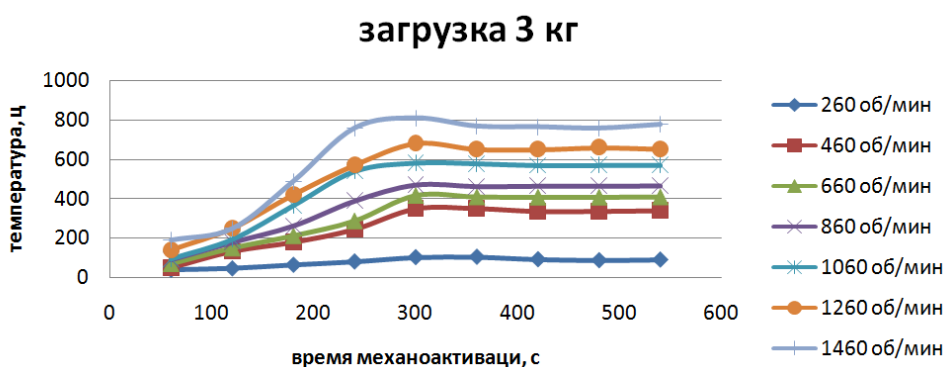


Рисунок 8 – Зависимость температуры мелющих тел от времени механоактивации, числа оборотов в минуту и загрузки (3 кг) барабана планетарной мельницы

Полученные данные были впервые обнаружены для планетарной мельницы типа АГО-3. Знания о приращении температуры позволяют нам вычислить скорость мелющих тел, которая является самым значимым управляющим параметром мельницы.

Предполагается, что кинетическая энергия шаров преобразуется в тепловую энергию, посредством лобового удара между мелющими телами и контейнером, которая идет на измельчение обрабатываемого материала. Преобразованная энергия составляет только 40 % от полной кинетической энергии (это было выявлено изучением отскока шарика от поверхности барабана). Определение параметров производилось калориметрическим методом. Зная начальную и конечную температуру мелющих тел и порошка, была вычислена полная энергия, «вкочанная в материал», по формуле:

$$E = M \cdot c \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

где,  $M$  – масса всех мелющих тел,  $c$  – теплоемкость,  $T, T_0$  – конечная и начальная температура соответственно.

Среднее максимальное значение скорости шаров находилась по формуле:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot R_k / 60, \quad (2)$$

где,  $\nu$  – частота вращения водила,  $R_k$  – радиус контейнера.

Полученные данные значений скорости при разных частотах вращения контейнера отобразены на рис. 9.

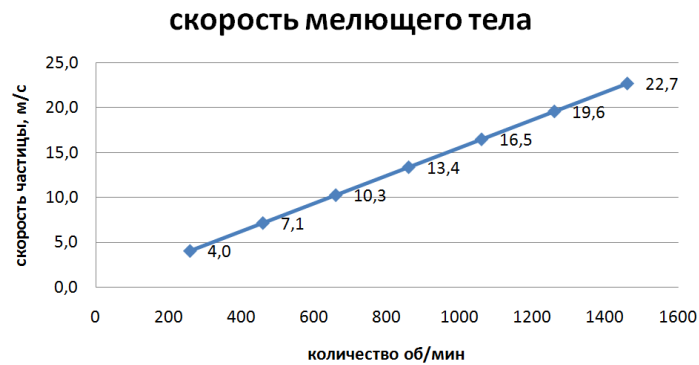


Рисунок 9 – Максимальные усредненные значения скорости мелющих тел

Тогда среднее число соударений всех мелющих тел вычисляется как:

$$n = M \cdot c \cdot (T(t) - T_0) / E_t \cdot t, \quad (3)$$

где  $T(t)$  – температура за время  $t$  механоактивации,

$$E_t = (m \cdot v^2 / 2) \cdot q, \quad (4)$$

где  $E_t$  – тепловая энергия мелющего тела,  $q$  – коэффициент теплоотдачи равный 0,4.

Полученные данные о количестве соударений в единицу времени изображены на рис. 10 и рис. 11.

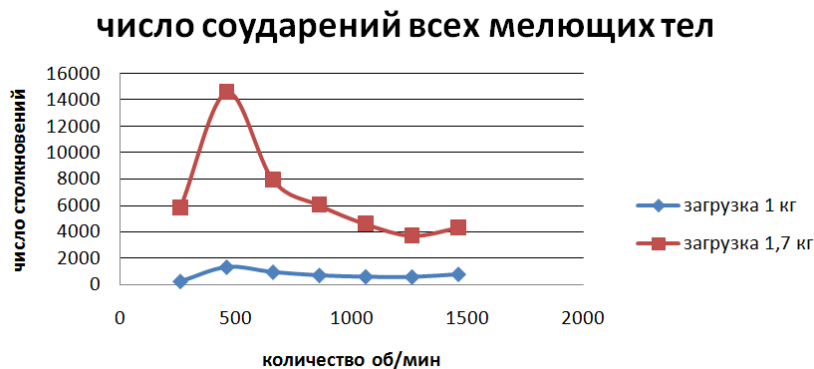


Рисунок 10 – График зависимости числа соударений всех мелющих тел от частоты вращения водила при разной загрузке контейнера

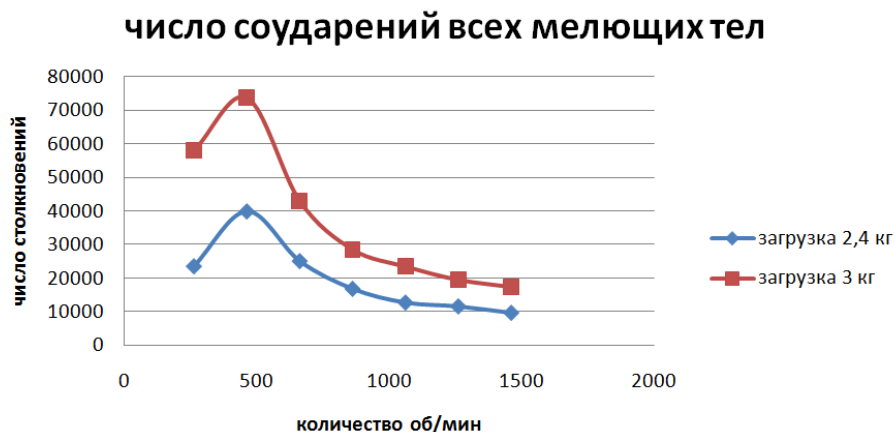


Рисунок 11 – График зависимости числа соударений всех мелющих тел от частоты вращения водила при разной загрузке контейнера

Расчет энергонапряженности планетарной мельницы АГО-3 производился по формуле:

$$W = E_t \cdot n \quad (5)$$

Полученные значения показаны на рис. 12 и рис. 13.

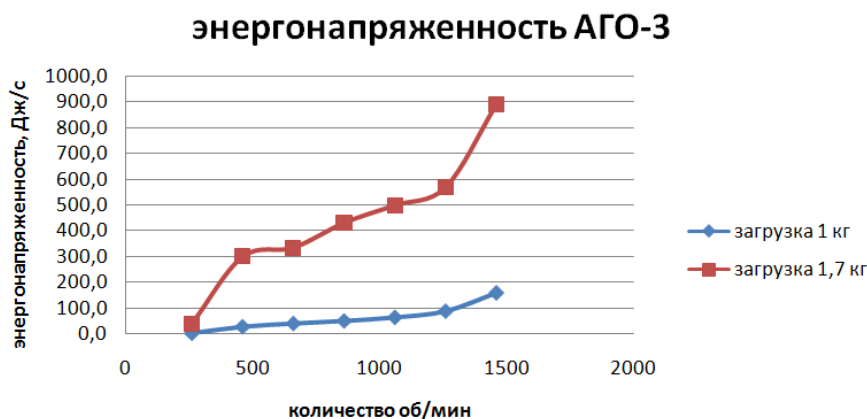


Рисунок 12 – Энергонапряженность планетарной мельницы АГО-3 при различной загрузке контейнера

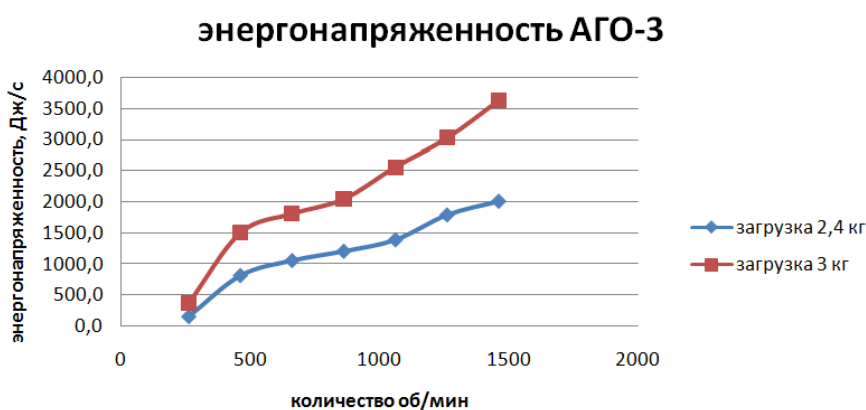


Рисунок 13 – Энергонапряженность планетарной мельницы АГО-3 при различной загрузке контейнера

В описанной работе никак не учитывалась роль трения. В работах с использованием прозрачной крышки и высокоскоростной камеры установили, что в планетарных мельницах между шарами и стенкой часто происходит проскальзывание.

Также, изменяя массу мелющих тел, и скорость вращения водила, были изучены разгонные характеристики мельницы (рис. 14, рис. 15). Разность площадей графиков механоактивации, протекающей с исследуемым образцом и без него, в дальнейшем позволит сделать вывод о подводимой к порошку энергии и предугадать размер и свойства получаемых на выходе наночастиц.

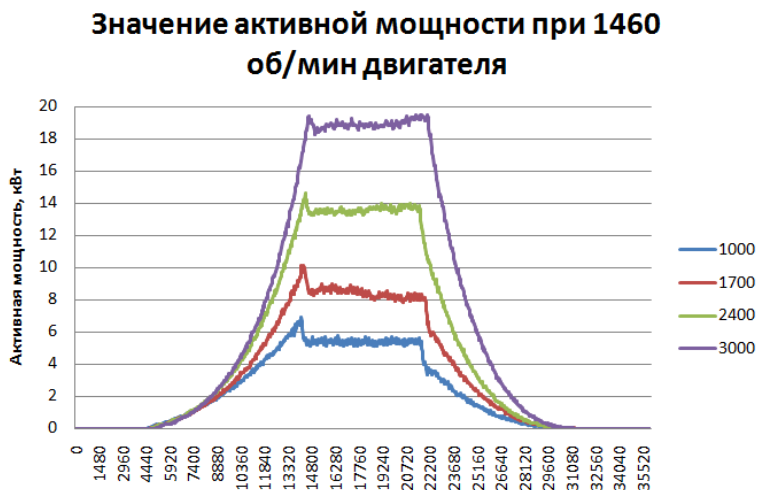


Рисунок 14 – Значение активной мощности при 1460 об/мин ( мел. тел 5 мм)

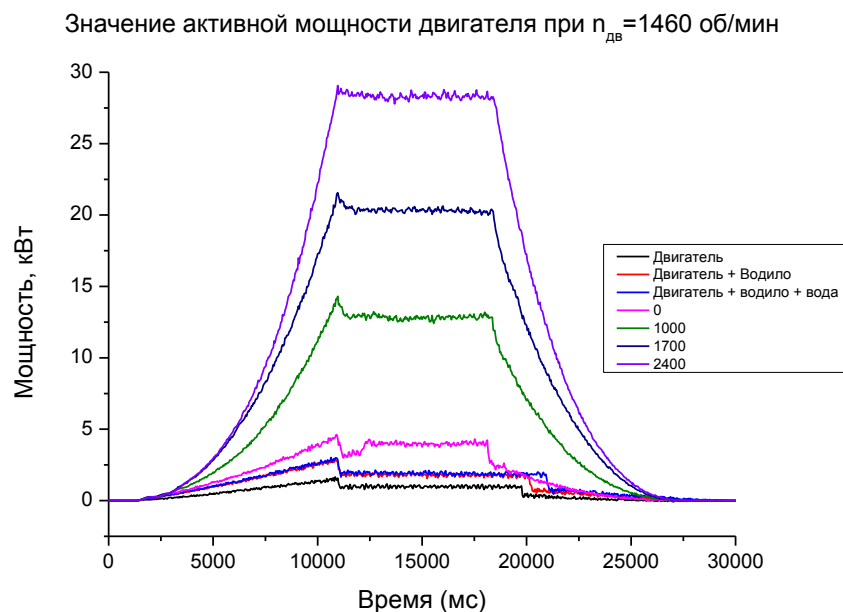


Рисунок 15 – Значение активной мощности при 1460 об/мин ( мел. тел 7 мм)

Принимая во внимание вышеизложенные данные, был сделан вывод об отсутствии «водопадного движения» мелющих тел при механоактивации.

### Выводы

Получены экспериментальные характеристики механоактиватора АГО-3: зависимость термонапряженности, энергонапряженности процесса механоактивации, коэффициента полезного действия активатора от степени наполнения контейнеров, скорости вращения приводного двигателя и времени процесса МА. Выявленные экспериментальные зависимости позволяют сделать следующие предположения:

1. Максимальная энергонапряженность мелющих тел на холостом ходу достигается в интервале 30–45 % объемного заполнения.

2. Большая часть механической энергии двигателя передается водилу и планетарным реакторам от 65 до 70 %, но наблюдается степенной рост ( $n \sim 2$ ) передаваемой энергии при увеличении частоты вращения.

3. Удельная энергонапряженность мельницы растет пропорционально кубической степени свободного объема реактора.

### Литература

1. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials [Text] / E. E. Komienko, E. J. Lapushkina, I. P. Gulyaev, et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. Vol. 567, № 1. – P. 012010.

2. Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology [Electronic resource] / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov, P. Yu. Gulyaev, et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24, Issue 11. – Pp. 1–8. – DOI: 10.1007/s11666-015-0356-6.

3. Development prospects of SHS technologies in Altai state technical university [Text] / V. V. Evstigneev, P. J. Guljaev, I. V. Miljukova, et al // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2006. – T. 15, № 1. – С. 99–104.

4. Gulyaev, I. Experience in plasma production of hollow ceramic microspheres with required wall thickness [Text] / I. Gulyaev // Ceramics International. – 2014. – Vol. 41, № 1. – Pp. 101–107. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.08.040/



5. Gulyaev, I. P. New High-Speed Combination of Spectroscopic And Brightness Pyrometry For Studying Particles Temperature Distribution In Plasma Jets [Text] / I. P. Gulyaev, K. A. Ermakov, P. Yu. Gulyaev // European researcher. – 2014. – № 3–2 (71). – С. 564–570.
6. Gulyaev, I. P. Production and modification of hollow powders in plasma under controlled pressure [Electronic resource] / I. P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 441, № 1. – P. 012033. – DOI: 10.1088/1742-6596/441/1/012033.
7. Gulyaev, I. P. Production and modification of hollow powders in plasma under controlled pressure [Electronic resource] / I. P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 441, № 1. – P. 012033. – DOI: 10.1088/1742-6596/441/1/012033.
8. Gulyaev, P. Yu. Plasma spraying of protective coatings from ferromagnetic SHS-materials [Text] / P. Yu. Gulyaev // Research Journal of International Studies. – 2013. – № 12–1 (19). – P. 74–77.
9. Increasing accuracy of high temperature and speed processes micropyrometry [Electronic resource] / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, A. G. Bebiya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 93, № 1. – P. 012021. – DOI:10.1088/1757-899X/93/1/012021.
10. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter [Electronic resource] / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, K.G. Poluhina // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028. – DOI:10.1088/1742-6596/643/1/012028.
11. Phase formation time evaluation in NiAl combustion systems by the thermal fields visualization method [Text] / M. P. Boronenko, A. E. Seregin, P. Yu. Gulyaev, I. V. Milyukova // Scientific Visualization. – 2015. – Vol. 7, № 5. – Pp. 102–108.
12. Phase formation time evaluation in NiAl combustion systems by the thermal fields visualization method [Text] / M. P. Boronenko, A. E. Seregin, P. Yu. Gulyaev, I. V. Milyukova // Scientific Visualization. – 2015. – Vol. 7, №5 – С. 102–108.
13. Temperature measurements for Ni-Al and Ti-Al phase control in SHS Synthesis and plasma spray processes [Text] / P. Yu. Gulyaev, I. P. Gulyaev, I. V. Milyukova, H.-Z. Cui // High Temperatures – High Pressures. – 2015. – Т. 44, № 2. – С. 83–92.
14. Бороненко, М. П. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. Е. Серегин // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 7–15.
15. Бороненко, М. П. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона с постоянной подачей порошка [Текст] / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Л. Трифонов // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 16–20.
16. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру [Текст] / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9–3. – С. 69–76.
17. Гуляев, И. П. Особенности получения и обработки полых частиц диоксида циркония в плазменных потоках [Текст] / И. П. Гуляев // Вестник Югорского государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 10–22.
18. Гуляев, И. П. Плазменная обработка дисперсных материалов [Текст] / И. П. Гуляев, Югорский государственный университет. – Ханты-Мансийск : РИО ЮГУ, 2013. – 115 с.
19. Гуляев, И. П. Плазменная обработка полых порошков в камере переменного давления [Текст] / И. П. Гуляев // Вестник Югорского государственного университета. – 2013. – № 2 (29). – С. 23–30.
20. Гуляев, И. П. Применение низкотемпературной плазмы для получения полых керамических порошков с заданными характеристиками [Текст] / И. П. Гуляев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3–3. – С. 123–126.
21. Гуляев, И. П. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному спектру [Текст] / И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 13–14.

22. Гуляев, П. Ю. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35, № 1.2. – С. 230–233.

23. Гуляев, П. Ю. Инерционное влияние внешней среды на результаты измерений и принципы его учета [Текст] / П. Ю. Гуляев, Ю. П. Гуляев, Р. Э. Минекес // Геодезия и картография. – 1996. – № 3. – С. 27–29.

24. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины [Текст] / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – Т. 35, № 1.1. – С. 144–148.

25. Гуляев, П. Ю. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 5–2. – С. 382–385.

26. Гуляев, Ю. П. Неразрушающий контроль и математическое моделирование деформаций оснований фундаментов по топографо-геодезическим измерениям [Текст] / Ю. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев // Современная техника и технологии. – 2015. – № 11 (51). – С. 93–96.

27. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3–2. – С. 70–73.

28. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3–2. – С. 70–73.

29. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–6. – С. 1194–1199.

30. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц [Текст] / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9–3. – С. 79–87.

31. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напыления [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–10. – С. 2135–2140.

32. Экспериментальное исследование процесса плазменно-дугового проволочного напыления [Текст] / И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, В. Н. Коржик [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 37–43.