

УДК 551.114(0758) + 553 + 666.32/36

ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛИН БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗРАБОТКЕ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Кормош Е.В., Алябьева Т.М., Погорелова А.Г.

Белгородский университет потребительской кооперации, Белгород, e-mail: kormosh-e@mail.ru

Были исследованы глины месторождения «Поляна» Шебекинского района Белгородской области с целью оценки возможности их использования в качестве сорбента для очистки сточных вод. Методами рентгенофазового, рентгеноструктурного, электрономикроскопического и электронографического анализа изучены образцы нативных и модифицированных глин этого месторождения. Показано, что данные глины относятся к монтмориллонитсодержащим и могут быть использованы для разработки сорбентов. Установлено, что в результате обогащения природных глин происходит увеличение содержания сорбционно-активных минералов, что приведет к увеличению сорбционной способности по отношению к ионам тяжелых металлов. Дальнейшее кислотное модифицирование обогащенных глин позволяет увеличить удельную поверхность и пористость, а следовательно прогнозировать сорбционную способность к органическим веществам.

Ключевые слова: глина, адсорбция, монтмориллонит, модифицирование

CHEMICO-MINERALOGICAL ASPECTS OF POSSIBILITY OF USAGE OF CLAYS IN BELGORODSKAYA OBLAST FOR SORBENT DEVELOPMENT FOR SEWAGE WATERS PURIFICATION

Kormosh E.V., Aljabjeva T.M., Pogorelova A.G.

Belgorod University of Consumer's Cooperation, Belgorod, e-mail: kormosh-e@mail.ru

Clays located in Polyana field of Shebekino region Belgorodskaya oblast were analyzed to estimate the possibility of their usage as a sorbent for sewage waters purification. The samples of native and modified clays of this field were analyzed by techniques of X-ray phase, X-ray structure, electronic-microscopical and electronic-graphical analyses. It is determined that such clays belong to montmorillonite type and can be used for sorbents development. It is defined that the content of sorption active minerals increases due to native clays enrichment that leads to the increase of sorption capacity in relation to heavy-metal ions. Further acid modification of enriched clays allows to enlarge specific surface and openness and consequently forecast the sorption capacity for organic matters.

Keywords: clay, adsorption, montmorillonite, modification

Очистка сточных вод, начиная со второй половины 20-го века, является первоочередной для всех стран мира. С коллоидно-химической точки зрения, сточные воды – это гетерогенная смесь растворенных коллоидных и взвешенных в воде примесей органического и неорганического характера. Одними из основных загрязнителей природных вод являются ионы тяжелых металлов, нефть, нефтепродукты, а также жиры, составляющие значительную часть в общей массе отходов промышленного производства [3]. Поэтому проблемы загрязнения природных вод, рост объемов сточных вод и поиск эффективных методов их очистки становятся актуальными.

Широко распространенными, экологически безвредными являются адсорбенты на основе природных и искусственных цеолитов, различные силикаты слоистой и ленточной структуры, в том числе монтмориллонитовые глины, которые характеризуются высокой поглотительной способностью, устойчивостью к воздействиям окружающей среды и могут служить прекрасными носителями для закрепления на поверхности различных соединений при их модифицировании [1, 4–6]. Сочетая сорбци-

онные свойства этих адсорбентов и различные способы обработки их поверхности, можно достичь максимального извлечения различных загрязняющих веществ [5].

Научно обоснованный и экономически целесообразный выбор глинистых материалов, способных сорбировать примеси органического и неорганического происхождения, связан с поиском недефицитных природных материалов и изучением возможностей их модифицирования.

Цель исследования – изучение сырьевых ресурсов Белгородчины для создания на их основе принципиально новых высокоэффективных сорбентов с целью повышения эффективности очистки сточных вод.

Материалы и методы исследования

С целью выявления потенциальных сорбентов были исследованы глины киевской свиты, протягивающиеся в границах Белгородской области полосой с севера на юг от г. Губкина, в частности глины карьера Шебекинского кирпичного завода (месторождение «Поляна»). Данные глины являются типичными представителями глин Белгородской области [2].

Для выявления отдельных фаз изучаемых глин проводили визуальный отбор проб по цвету, твердости; разделяли по фракциям методом отмучивания. Микроструктурные исследования образцов проводили с помощью программно-аппаратного комплек-

са, включающего ионно-электронный растровый микроскоп Quanta 200 3 D. Аналитические электронно-микроскопические исследования включали в себя светопольное исследование в трансмиссионном электронном микроскопе в сочетании с микродифракцией электронов (JEM-100C) и энергодисперсионным определением элементного состава (KEVEX-5100). Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Удельную поверхность определяли с использованием прибора AUTOSORB-1C и на анализаторе дисперсности порошков – АДП-1АМ. Электрокинетический потенциал определяли методом электрофореза на приборе Zetasizer Nano. Для определения гранулометрического состава образцов использовали метод динамического лазерного светорассеяния (прибор Micro Sizer 201C), метод отмучивания, с полным выделением фракций, весовой метод и ситовый анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве потенциальных сорбентов были изучены образцы глин Г-1 светло-зеленого цвета (глубина отбора пробы 3,5 м) и Г-2 (глубина отбора пробы 4,5 м) желто-зеленого цвета. Обе глины визуально представляют собой крепкую с раковинистым изломом осадочную породу, тонкодисперсную с небольшими равномерными включениями кварца и полевого шпата алевритовой размерности и тонкорассеянных чешуек мусковита.

Методом РФА, электронно-микроскопического и электронно-графического изучения установлено, что природные глины представляют собой полиминеральную систему и основным минералом является монтмориллонит – сорбционно-активный глинистый минерал группы смектитов с идеализированной формулой $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ [7].

Минералогический состав глины Г-1 представлен кальциевой формой монтмориллонита (1,63; 0,450; 0,4493; 0,2424; 0,1740; 0,169; 0,1512 нм), иллитом (1,0281;

0,4493; 0,2978; 0,1659; 0,1512 нм), каолинитом (0,714; 0,4493; 0,258; 0,1512 нм), клиноптилолитом (0,8988; 0,523; 0,397; 0,3702; 0,2978; 0,2838; 0,1659 нм), кальцитом (0,3038; 0,213; 0,2019; 0,1915; 0,1862; 0,1619 нм), низкотемпературным кварцем (0,3346; 0,228; 0,1820; 0,1546 нм), гидрослюдой (0,2838; 0,2527; 0,2018; 0,1959; 0,148 нм), полевыми шпатами (0,5953; 0,3236; 0,3113; 0,2607; 0,1915; 0,1740 нм). Положение рефлекса $d_{001} = 1,47$ нм указывает, что монтмориллонит в межпакетных позициях преимущественно содержит катионы кальция или магния. Наличие рефлекса $d_{020} = 0,451$ нм характеризует диоктаэдрическую структуру монтмориллонита.

Образец глины Г-2 содержит кальциевый и натриевый монтмориллонит (1,5450; 1,2923; 0,4484; 0,2592; 0,2489; 0,1767; 1,502 нм), иллит (1,0091; 0,4484; 0,3795; 0,3236; 0,2971; 0,1639; 0,1502 нм), каолинит (0,7161; 0,4484; 0,2592; 0,1502 нм), клиноптилолит (0,8131; 0,5252; 0,3976; 0,2971; 0,2800; 0,1767 нм), кальцит (0,2489; 0,2145; 0,2018; 0,1878 нм), пирофиллит (0,2407; 0,2067; 0,1767; 0,1559 нм), гидрослуду (0,4566; 0,3607; 0,2592; 0,1767; 0,1559 нм), полевые шпаты (0,3236; 0,2330; 0,1731). Отм, что в глине Г-2 монтмориллонит представлен натриевой формой, свидетельствует рефлекс $d_{001} = 1,236$ нм.

Из химического анализа (табл. 1) следует, что исследуемые природные глины незначительно отличаются по содержанию оксидов. Несколько большее содержание Na_2O в образце Г-2 характеризует монтмориллонит с преобладанием ионов Na^+ в межпакетных позициях. Более высокое содержание оксидов Са, К в образце Г-1 указывает на кальциевую разновидность монтмориллонита с долей гидрослуды и кальцита в образце.

Таблица 1

Химический состав природных глин, масс. %

Образец	Al_2O_3	SiO_2	FeO	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
Г-1	9,43– 9,80	65,6– 66,3	0,36– 0,41	3,38– 3,41	1,42– 1,45	7,66 –7,94	0,22– 0,28	2,30– 2,50	0,43– 0,46	0,04– 0,05
Г-2	12,3– 12,4	61,6– 62,4	0,20– 0,22	3,68– 3,95	2,25– 2,27	4,63– 4,72	0,64– 0,66	1,76– 1,81	0,69– 0,71	0,05– 0,06

Одной из характеристик сорбентов является обменная емкость. В случае монтмориллонита и некоторых других глинистых минералов обменная емкость обусловлена существованием катионов, способных к обмену. Катионно-обменный комплекс глин содержит катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Сумма обменных катионов рав-

на 85,7 и 93,4 мг-экв/100 г, соответственно для образцов Г-1 и Г-2.

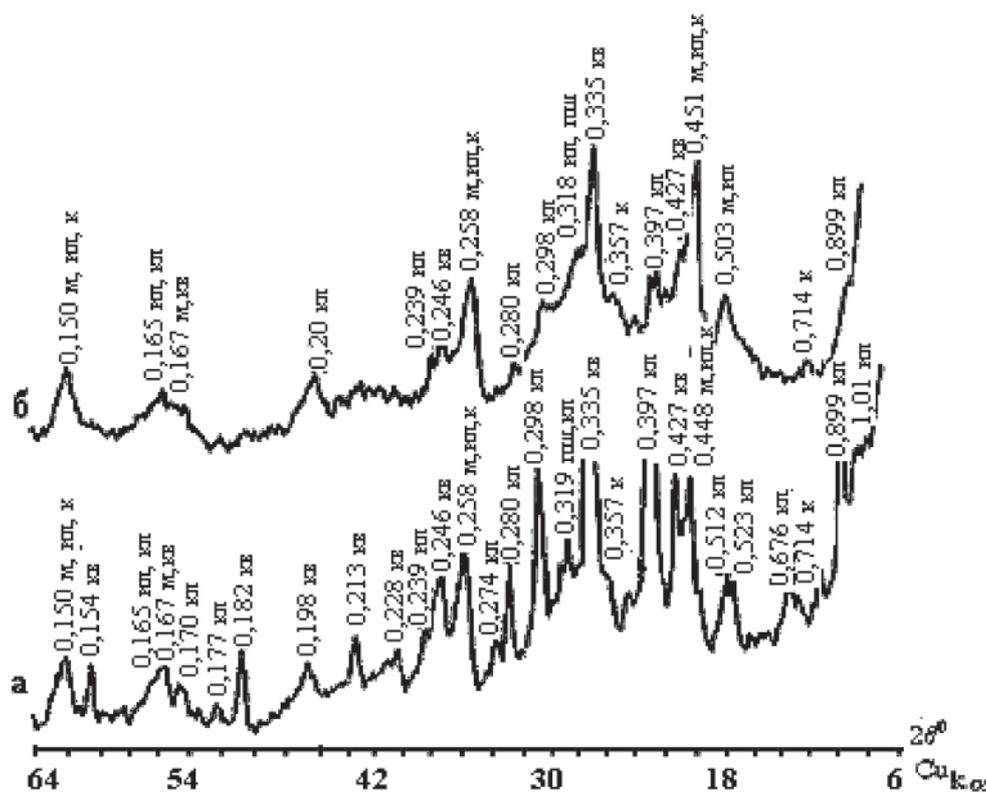
Глина Г-2 является более тонкодисперсной. Содержание фракций, с размером глинистых частиц менее 10 мкм, составляет 74,3 масс.%. Это в 1,6 раза больше по сравнению с глиной Г-1. Большая дисперсность второй глины, при одинако-

вых условиях помола, обусловлена различием химического состава указанных глин.

Одним из направлений улучшения качества сорбентов является использование эффективных методов их обогащения и модифицирования. Увеличить содержание сорбционно-активных минералов, в частности монтмориллонита, а следовательно повысить сорбционную способность природных глин возможно удалением пустой породы – кварцевого песка и других неглинистых сорбционно-неактивных минералов. Для этого использовали метод гравитационного обогащения. Руководствуясь ГОСТ 12536–79 получены обогащенные

формы глин с диаметром частиц менее 0,05; 0,01; 0,005; 0,001 мм.

Рентгенофазовым анализом установлено, что в результате обогащения увеличивается содержание монтмориллонита, клиноптилолита, иллита за счет снижения содержания кварца. Глина Г-2 фракции менее 0,001 мм согласно рентгеновским порошковым дифрактограммам представлена преимущественно монтмориллонитом и иллитом, в небольших количествах присутствуют кварц, клиноптилолит и аморфный кремнезем (рисунок). Фракция 0,01–0,001 мм этой глины обогащена цеолитами, присутствуют кварц, монтмориллонит, иллит, полевые шпаты и аморфная часть.



Рентгеновские порошковые дифрактограммы фракционированной глины Г-2:
а – фракция менее 0,001 мм, б – фракция 0,01-0,001 мм

Таким образом, из данных РФА следует, что сорбционно-активные минералы (монтмориллонит, клиноптилолит) присутствуют практически во всех пробах, однако их максимальное содержание во фракциях с размером частиц менее 1 мкм.

Вследствие увеличения числа и интенсивностей рефлексов, характеризующих сорбционно-активный минерал – монтмориллонит, обогащение глин должно привести к увеличению сорбционной способности.

По данным химического анализа природных (см. табл. 1) и обогащенных (табл. 2)

глин с размером глинистых частиц менее 10 мкм наблюдается изменение химического состава.

Установлено уменьшение содержания SiO_2 на 19,2 и 22,1%, TiO_2 на 39,4 и 50% и увеличение Al_2O_3 на 24,4 и 32,8%, MgO на 3,81 и 7,64%, Fe_2O_3 на 45,5 и 48,7 масс. % в общем для глин Г-2 и Г-1 соответственно. Большее количество указанных выше оксидов в обогащенных образцах способствует увеличению содержания монтмориллонита. Например, для высокодисперсной фракции (размер частиц менее 1 мкм) массовая

доля монтмориллонита увеличилась от 43,3 до 74,3 масс. % у глины Г-1 и от 50,1 до 95,2 масс. % у глины Г-2.

Удельная поверхность обогащенных глин, вычисленная по скорости фильтрации воздуха через слой дисперсного материала, увеличивается с уменьшением размера ча-

стиц (табл. 3). Возрастание истинной плотности свидетельствует об увеличении степени упаковки кристаллической структуры монтмориллонита. Это подтверждается более высоким содержанием оксидов Al Mg, Fe и др., катионы которых входят в состав минерала.

Таблица 2

Химический состав обогащенных образцов глин

Образец	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Г-1	14,6	53,7	0,23	6,65	1,57	8,10	2,61	3,40	0,23	0,04
Г-2	16,4	52,4	0,24	7,25	2,36	5,08	4,76	3,16	0,43	0,05

Таблица 3

Удельная поверхность ($S_{уд}$) и истинная плотность (d) различных фракций глин

Вид образца	Наименование показателя			
	$S_{уд}$, м ² /кг	d , кг/м ³	$S_{уд}$, м ² /кг	d , кг/м ³
	Г-1		Г-2	
Природная глина	798	2380	920	2500
Фракция менее 50 мкм	872	2443	995	2566
Фракция менее 10 мкм	915	2520	1074	2630
Фракция менее 5 мкм	1018	2592	1130	2710
Фракция менее 1 мкм	1210	2670	1290	2793

Важное свойство природных адсорбентов на основе каркасных и слоистых силикатов – возможность их активации и модифицирования с помощью химических реагентов таких, как кислоты (соляная, серная, уксусная и др.), щелочи, соли, а также посредством гидротермальной или термической обработки в различной комбинации этих приемов. Подобное модифицирование адсорбентов приводит к увеличению межпакетного расстояния, выщелачиванию катионов, увеличению ионнообмена, удельной поверхности, что, в свою очередь, ведет к росту адсорбционной емкости. Использование кислотной обработки позволяет эффективно воздействовать на структуру минерала и создавать дефектность кристаллической решетки сорбционно-активных минералов.

Обогащенный образец глины Г-2, с размером частиц менее 10 мкм, был обработан 10, 20, 30% H₂SO₄ в течение 1, 2, 3, 6 ч при температуре кипения водяной бани. С увеличением продолжительности обработки глины серной кислотой и с увеличением ее концентрации наблюдается вытеснение щелочных и щелочноземельных металлов,

железа и алюминия, в результате чего содержание диоксида кремния непрерывно растет.

Данные рентгеновского анализа указывают на разрушение кристаллической структуры монтмориллонита под действием кислоты. С увеличением времени обработки интенсивность рефлекса отражения $d_{001} = 1,54$ нм, характерного для монтмориллонита, снижается. Образцы, обработанные 20 и 30% кислотой, показывают в этой области сильно размытое отражение, свидетельствующее о снижении содержания монтмориллонита. Аналогично происходит и с отражением 0,448 нм, характерным для монтмориллонита. С ростом концентрации кислоты отражения для кварца (0,335, 0,246, 0,213, 0,182, 0,154 нм) приобретают более четкий вид.

В процессе обработки кислотой значение электрокинетического потенциала глины уменьшается по абсолютной величине. До обработки кислотой ξ -потенциал поверхности составлял –43,5 мВ. После обработки 10, 20, 30%-й H₂SO₄ (6 ч) значение ξ -потенциала соответственно составило –30,3; –29,2; –28,8 мВ. Теоретически это объясняется тем, что ионы H⁺ обрабатываемой кислоты занимают обменные положения и, проникая в структуру монтмориллонита, вызывают разрыв связи Me–O. Катионы металлов Mg²⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Fe²⁺ переходят из межпакетного пространства в обменное положение. Затем катионы Al³⁺ вытесняют ионы Mg²⁺, Fe³⁺, Fe²⁺ из обменных позиций. Вследствие чего уменьшается величина изоморфных замещений в тетраэдрическом и октаэдрических слоях структуры монтмориллонита. Это приводит к уменьшению ξ -потенциала по абсолютной величине.

Обработка 30% H₂SO₄ (6 ч) увеличивает удельную поверхность обогащенной глины в 1,73 раза (табл. 4). Это связано с наличием в модифицированных кис-

лотой образцах свободного силикагеля, образованного вследствие разрушения структуры монтмориллонита. Уменьше-

ние истинной плотности свидетельствует об увеличении дефектности кристаллической структуры.

Таблица 4

Удельная поверхность и плотность глин, обработанных кислотой

H ₂ SO ₄ , масс. %	S _{уд} , м ² /кг	d, кг/м ³	S _{уд} , м ² /кг		S _{уд} , м ² /кг	d, кг/м ³
	1 ч		2 ч	3 ч	6 ч	
10	1275	2608	1340	1376	1595	2420
20	1352	2560	1375	1398	1680	2380
30	1404	2503	1428	1416	1860	2320
Обогащенная глина					1074	2630

Повышение удельной поверхности у образцов глин, обработанных кислотой, позволяет предположить рост сорбционной способности к органическим веществам, молекулы которых сорбируются только на внешней поверхности сорбционно-активных минералов.

Заключение

На основании рентгенофазового анализа показано, что глины месторождения «Поляна» Шебекинского района относятся к полиминеральным системам и основным минералом является монтмориллонит.

По результатам химического и минералогического анализа глины, отобранные с разных слоев, незначительно отличаются друг от друга. Однако большее содержание оксида Na₂O в глине Г-2 позволяет предположить большую сорбционную активность. Это связано с тем, что ионы Na⁺, находясь в обменных положениях кристаллической решетки монтмориллонита, легче обмениваются на ионы других металлов из раствора.

Выделение отдельных фракций глин методом обогащения ведет к повышению доли глинистых сорбционно-активных минералов, в частности монтмориллонита, и к увеличению содержания обменных катионов в их структуре, что позволяет предположить повышение сорбционной способности в отношении ионов тяжелых металлов.

При обработке глин растворами кислот улучшение адсорбционных свойств монтмориллонита, преимущественно к органическим веществам, связано с частичным растворением оксидов алюминия, железа и магния в горячих кислотах и образованием аморфного кремнезема.

Таким образом, изучение химического и минералогического состава природных, обогащенных и модифицированных глин позволяет прогнозировать их сорбционные свойства. Адсорбционные и катионообменные показатели глин напрямую зависят

от содержания основного сорбционно-активного минерала монтмориллонита, его структурных и кристаллохимических особенностей.

Проведенные исследования позволяют предложить использовать глину месторождения «Поляна» для получения сорбентов очистки воды от ионов тяжелых металлов и органических веществ.

Список литературы

1. Везенцев А.И., Трубицин М.А., Романщак А.А. Разработка эффективных сорбентов на основе минерального сырья Белгородской области // Сорбенты как фактор качества жизни и здоровья: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. (Белгород, 11-14 окт. 2004 г.) – Белгород: 2004. – С. 29–33.
2. Везенцев А.И., Трубицин М.А., Романщак А.А. Сорбционно-активные породы Белгородской области // Горный журнал. – 2004. – № 1. – С. 51–52.
3. Голдовская Л. Ф. Химия окружающей среды. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 295 с.
4. Годымчук А.Ю., Решетова А.А. Исследование процессов извлечения тяжелых металлов на природных минералах // Вестник Отделения наук РАН. – 2003. – № 1 (21). – С. 1–3.
5. Гончарук А.Ю., Ильин А.П. Исследование сорбционных процессов на природных минералах и их термомодифицированных формах // Химия и технология воды. – 2004. – Т. 26, № 3. – С. 287–298.
6. Лисичкин Г.В. Химическое модифицирование поверхности минеральных веществ // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 4. – С. 52–56.
7. Рекшинская Л.Г. Атлас электронных микрофотографий глинистых минералов и их природных ассоциаций в осадочных породах. – М.: Недра, 1966. – 230 с.

Рецензенты:

Бессмертный В.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии и художественной обработки стекла Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, г. Белгород;

Слюсарь А.А., д.т.н., профессор кафедры физической и коллоидной химии Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 21.01.2011.

УДК 62-229.331:621.924

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШПИНДЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ ВНУТРИШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Космынин А.В., Щетинин В.С., Хвостиков А.С., Смирнов А.В., Блинков С.С.

*ГОУВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: faks@knastu.ru*

Выявлен перспективный тип опор шпиндельных узлов для высокоскоростной обработки. Создана опытно-промышленная модель высокоскоростного шпиндельного узла с передней газомангнитной опорой для внутришлифовальных станков. Эксплуатационные испытания шпиндельного узла показали высокое качество обработки деталей.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, шпиндельный узел, газомангнитная опора

THE HIGH SPEED SPINDLE UNITS INSIDE GRINDING MACHINE FOR PRECISION PROCESSING DETAIL OF FLYING MACHINERY

Kosmynin A.V., Shchetinin V.S., Khvostikov A.S., Smirnov A.V., Blinkov S.S.

*SEIHPЕ «Komsomolsk-na-Amure state technical university»,
Komsomolsk-na-Amure, e-mail: faks@knastu.ru*

Exposed perspective type bearings of spindle units for high speed processing. Created experimental industrial model high speed spindle units with front gas-magnetic bearing for inside grinding machine. Operational tests spindle units showed high quality processing materials.

Keywords: high speed processing, spindle units, gas-magnetic bearing

Известно, что трудоемкость операций механической обработки деталей и узлов летательных аппаратов (ЛА) на металлорежущих станках доходит до 35% от общей трудоемкости изготовления изделий. В связи с этим большую актуальность приобретают задачи повышения эффективности механической обработки, решение которых способствует снижению трудовых затрат, уменьшению эксплуатационных расходов и повышению производительности отдельных операций.

Перспективным путем снижения объема доводочных работ, повышения производительности, точности и себестоимости изготовления деталей ЛА является высокоскоростная обработка. В связи с этим высокие требования по точности и параметрической надежности предъявляются к шпиндельным узлам металлорежущих станков, которые, как показывают исследования [3], до 80% определяют точность обработки изделий. Поскольку движение формообразования осуществляется шпинделем и шпиндельными подшипниками, то именно они вносят решающий вклад в выходные характеристики станков.

Работа шпиндельных узлов (ШУ) на опорах качения сопровождается нестабильной траекторией движения шпинделя, тепловыми смещениями подшипниковых узлов, периодическим изменением жесткости подшипников, что связано с изменением угла поворота сепаратора с комплектом тел

качения и т.д. Применение в конструкциях высокоскоростных ШУ гидростатических подшипников приводит к ограничению частоты вращения шпинделя (из-за потерь на трение) и усложнению конструкции опорного узла. Шпиндели на электромагнитных опорах пока не нашли широкого применения в ШУ вследствие сложности и высокой стоимости шпинделей и электронных систем управления. Указанных недостатков лишены ШУ с подшипниками на газовой смазке. Вместе с тем ШУ на газостатических опорах имеют сравнительно невысокую силу резания, что ограничивает область их применения. Исследования, выполненные в Комсомольском-на-Амуре ГТУ [1], показали, что разные способы организации наддува газа в зазор газостатических опор не ведут к существенному росту выходных характеристик ШУ.

Дальнейшее совершенствование характеристик шпиндельных узлов на бесконтактных подшипниках должно идти по пути внедрения в их конструкцию комбинированных опор. Таким конструктивным решением может служить комбинированная газомангнитная опора, предложенная в Комсомольском-на-Амуре ГТУ [2], сочетающая в себе достоинства газовых и магнитных опор. Обширный комплекс теоретических и экспериментальных исследований выходных характеристик ШУ на газомангнитных опорах позволил сделать вывод о широкой перспективе использования таких