

2. **Углеродные** нанотрубки [Электронный ресурс]. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.phpn_id=.644.
3. **Голованов, Е.В., Блохин, А.Н.** Определение оптимальных режимных параметров процесса ультразвукового диспергирования углеродных нанотрубок в эпоксидном связующем // *Современные научные исследования и инновации*. 2013. № 7 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/07/25361>.
4. **Трубашевский Д., Ежеленко В.** Эра аддитивного производства наступает // САПР и графика. – 2015. – № 7. – С. 62–65.
5. **Григорьев, С.Н., Смуров, И.Ю.** Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // *Инновации*. – 2013. – № 10. – С. 76–82.
6. **Каблов, Е.Н.** Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
7. **Конов, С.Г., Котобан, Д.В., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С.** Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2015. – № 9(51). – С. 28–34.

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M. *High-power Ultrasound in Metallurgy and Mechanical Engineering* / under the general editorship of

- O.V. Abramov and V.M. Prikhodko. M.: Janus-K, 2006. pp. 688.
2. Carbonic Nano-Tubes [Electronic Resource]. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.phpn_id=.644.
3. Golovanov, E.V., Blokhin, A.N. Optimum mode parameter definition for ultrasonic dispersion processes of carbonic nano-tubes in epoxy coupler // *Modern Scientific Investigations and Innovations*. 2013. № 7 [Electronic Resource]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/07/25361>.
4. Trubashevsky D., Yezhelenko V. Additive production era arrives // *CAD and Graphics*. 2015. № 7. pp. 62–65.
5. Grigoriev, S.N., Smurov, I.Yu. Outlooks in innovation additive production development in Russia and abroad // *Innovations*. – 2013. – № 10. – pp. 76–82.
6. Kablov, E.N. Strategic directions in development of materials and techniques of their processing up to 2030 // *Aircraft Materials and Techniques*. – 2012. – № 5. – pp. 7–17.
7. Konov, S.G., Kotoban, D.V., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Outlooks in application of ultrasonic techniques in additive production // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 28–34.

Рецензент д.т.н. А.А. Ситников

УДК 621.001.4
DOI: 10.12737/20816

А.О. Горленко, д.т.н.
(Брянский государственный технический университет)
E-mail: bugi12@bk.ru

Повышение износостойкости поверхностей трения сферических подшипников скольжения финишным плазменным упрочнением

Рассмотрена технология финишного плазменного упрочнения с нанесением многослойного нанопокрyтия системы Si–O–C–N применительно к упрочнению поверхностей трения сферических подшипников скольжения. Исследованы трибологические характеристики наносимого износостойкого антифрикционного покрытия, которые обуславливают повышение износостойкости сферических подшипников скольжения.

Ключевые слова: износостойкость; многослойное антифрикционное покрытие; поверхность трения; сферический подшипник скольжения; плазменное упрочнение.

Wear resistance increase in friction surfaces of spherical journal bearings by finish plasma strengthening

The technology of finish plasma strengthening (FPS) with the multi-layer nano-coating of the Si-O-CN system as applied to the friction surface strengthening in spherical journal bearings is considered. This method relates to the processes of tubeless chemical precipitation of coatings at atmosphere pressure with the use of volatile fluids of element-organic compounds and gas environment with the simultaneous activation of a surface by electroarc plasma. The essence and distinguishing features of FPS are analyzed. Tribological characteristics of an applied wear resistant antifriction coating are investigated which stipulate for wear resistance increase in spherical journal bearings.

Keywords: wear resistance; multi-layer antifriction coating; friction surface; spherical journal bearing; plasma strengthening.

Одним из новых методов упрочнения поверхности, обеспечивающим нанесение износостойких тонкопленочных покрытий, является процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ), основанный на применении плазменной струи, истекающей при атмосферном давлении. Эффективность данного процесса основана на использовании малогабаритного и экономичного оборудования, обеспечивающего возможность нанесения упрочняющих нанопокровов. Данный метод относится к аддитивным технологиям.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия на основе системы Si-O-C-N, взятым за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, которые вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии [1].

В качестве плазмообразующего газа применяется аргон, который обеспечивает повышенную долговечность и надежность элементов плазмотрона при длительном ведении процесса. В качестве материалов для образования покрытия используются пары летучих жидких реагентов, подача которых в реактор осуществляется специальным дозатором. Источником питания плазмотрона служит инвертор постоянного тока со специальной вольт-амперной характеристикой. Для стабильного охлаждения реактора и плазмотрона используется охладитель, изготовленный на базе холодильного агрегата. Система мониторинга процесса обеспечивает управление и контроль

параметров обработки, а также определение толщины наносимого покрытия в процессе его осаждения.

Сущность и отличительные особенности ФПУ. За рубежом в качестве основных технологий нанесения износостойких нанопокровов используются процессы химического (*chemical vapor deposition – CVD*) и физического (*physical vapor deposition – PVD*) осаждения покрытий из газовой фазы. Покрытие в безвакуумной технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи 10...100 мм/с наносится слоями толщиной 30...3 нм [1].

Циклическое взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности при ФПУ определяет получение многослойной структуры покрытия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, полностью исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Интегральная температура упрочняемых деталей при нанесении покрытия как правило не превышает 150°C. Формируется упрочняющее покрытие в виде прозрачной пленки, которая на полированной поверхности имеет вид интерференционной картины с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного в зависимости от толщины покрытия.

Технология финишного плазменного упрочнения объединяет положительные эффекты процессов MO-CVD и PE-CVD. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гиб-

ко управляемой электродуговой плазмы.

Процесс образования покрытия при ФПУ протекает в несколько стадий:

- создание устойчивого потока плазмы дугового разряда;
- испарение технологических препаратов в жидкостном питателе и перенос их паров совместно с дополнительным потоком газов в плазму дугового разряда;
- получение в плазмохимическом реакторе пароплазменного потока, содержащего атомы, положительно и отрицательно заряженные ионы и электроны;
- прохождение плазмохимических реакций в плазме дугового разряда с образованием новых соединений и их перенос плазменной струей к подложке;
- конденсация паров и продуктов реакций на подложке при касании факела плазменной струи поверхности изделия;
- взаимодействие между адсорбированными осажденными веществами и граничным слоем поверхности подложки, приводящее к зарождению и росту покрытия.

Вышеперечисленные стадии присутствуют, как известно, и в PVD-процессах. Но в отличие от них при ФПУ покрытие образуется при атмосферном давлении окружающей среды без применения вакуумных камер. Кроме этого, износостойкие покрытия, наносимые в вакууме методами PVD на подложку с температурой поверхности менее 250 °С, обычно имеют пониженную адгезию.

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 150 °С; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Выбор материала покрытия, наносимого методом ФПУ, определяется на основе знаний механизмов изнашивания различных изделий, а также анализа имеющегося опыта применения различных соединений в качестве покрытий.

Если рассматривать принципиально любую трибосистему, работающую в условиях адгезионного, усталостного, окислительного и абразивного изнашивания, то наибольшую перспективу в качестве тонкопленочных покрытий имеют неметаллические твердые материалы – карбиды, нитриды, бориды, силициды, оксиды, композиционные материалы на их основе, керметы и алмаз [2].

При этом покрытие должно иметь максимальную адгезию и близкий коэффициент термического расширения к материалу упрочняемой детали, а его поверхностные свойства – соответствовать характеристикам, повышающим долговечность изделия, т.е. иметь высокую твердость, химическую инертность, термическую стабильность, низкую теплопроводность, минимальный коэффициент трения и др.

Проведенный рентгенофазовый анализ подтверждает, что после ФПУ покрытие формируется в аморфном состоянии, при котором отсутствует дислокационная активность, и покрытие обладает высокими значениями сопротивления пластической деформации и упругого восстановления. Покрытие системы Si–O–C–N, нанесенное с использованием технологии ФПУ, характеризуется высокой твердостью при низком значении модуля упругости и близостью значений модуля упругости покрытия и материала основы, что объективно должно приводить к увеличению износостойкости поверхностного слоя.

Трибологические характеристики. В качестве объекта исследований трибологических характеристик использовались сферические подшипники скольжения ШС30 (ГОСТ 3635–78, ISO 6125–82).

Упрочнению подвергались наружные сферические поверхности внутренних колец сферических подшипников скольжения ШС30, внешний вид которых представлен на рис. 1.



Рис. 1. Сферические поверхности подшипников скольжения ШС30, обработанные ФПУ (слева) и изготовленные по заводской технологии (справа)

Заводская технология (базовый вариант) предусматривает объемную закалку внутреннего кольца сферического подшипника, изготовленного из легированной стали ШХ15, с последующей абразивной обработкой (шлифованием) сферической поверхности. Технология ФПУ сферических поверхностей под-

шипников была реализована в ООО «НПФ «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург). Нанотвердость покрытия составляет 23 ГПа.

Испытания износостойкости модифицированных сферических подшипников скольжения и изготовленных по заводской технологии проводились на разработанной и изготовленной установке на базе машины трения МИ-1М, позволяющей определять триботехнические показатели поверхностей трения сферических подшипников скольжения с применением автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) [3 – 6].

Общий вид установки для испытаний износостойкости сферических подшипников скольжения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид АСНИ

План испытаний подшипников представлен

1. План испытаний подшипников

№ подшипника	Метод окончательной обработки сферы	Смазочный материал	
		Для предварительной подготовки	Основной
1	Базовый вариант	–	MolykoteBR 2 Plus
2	Базовый вариант	–	Gazpromneft Grease L
3	ФПУ	MolykoteD-321R	Molykote Longterm 2 Plus
4	ФПУ	Molykote G-Rapid Plus	Molykote Longterm 2 Plus

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств:

– время приработки t_0 , ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;

в табл.1, в которой указаны номера испытуемых подшипников, метод окончательной обработки сферической поверхности трения внутреннего кольца подшипника, применяемый смазочный материал для предварительной подготовки основной и испытуемой поверхностей. Испытания подшипников проводились при следующих условиях: скорость относительного скольжения сферических поверхностей $v = 0,84$ м/с (при диаметре сферических поверхностей $d = 40$ мм и частоте вращения $n = 400$ мин⁻¹); нормальное усилие нагружения $N = 2000$ Н (соответствует давлению, рассчитанном по Герцу, порядка 11 МПа); вид смазки – граничная; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – в соответствии с планом испытаний (см. табл.1); общее время испытаний каждого подшипника – 6 ч.

В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор персонального компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытуемого образца [4, 5].

– приработочный износ h_0 , мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания приработки t_0 ;

– значение коэффициента трения в конце испытаний f ;

– f_0 / f – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработ-

ки f_0 к его значению в конце испытаний f ;
 – среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания $I_h = (h - h_0)/(L - L_0)$, где h – суммарная величина износа образца за время испытаний, мкм; L – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм;
 $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 t_0 v$ – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки, мкм;
 – значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний

$$I_{h\Sigma} = h / L.$$

Результаты трибологических испытаний подшипников представлены в табл. 2.

Следует отметить, что применяемый смазочный материал не покидает зону трения на рабочих поверхностях сферических подшипников скольжения на протяжении всего времени проведения испытаний, что обеспечивается его свойствами.

Несмотря на то, что за время испытаний (процесс первоначальной приработки и нормального изнашивания) сферических подшипников скольжения изнашивается значительная величина упрочненного слоя, необходимо помнить о том, что в процессе приработки и начального периода нормального изнашивания закладываются основные предпосылки и закономерности дальнейшего процесса трения и изнашивания данного изделия при длительной эксплуатации, что в первую очередь влияет на его износостойкость и долговечность наряду с другими, имеющими место при эксплуатации факторами.

Результаты испытаний в графическом виде (интерфейс пользователя АСНИ) для трибо-

технических испытаний подшипников (см. табл. 1), представлены на рис. 3.

Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия Si-O-C-N и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает меньшим значением коэффициента трения. При этом сократилось время приработки и уменьшилась интенсивность изнашивания. Кривая износа покрытия Si-O-C-N более стабильна, и имеется тенденция к уменьшению скорости роста износа после окончания приработки. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику.

Заключение

Износостойкость сферических подшипников скольжения, обработанных методом ФПУ, повысилась по сравнению со сферическими подшипниками скольжения, изготовленными по заводской технологии, в 5–14 раз (по значениям интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания), в 6–9 раз (по значениям интенсивности изнашивания за общее время испытаний).

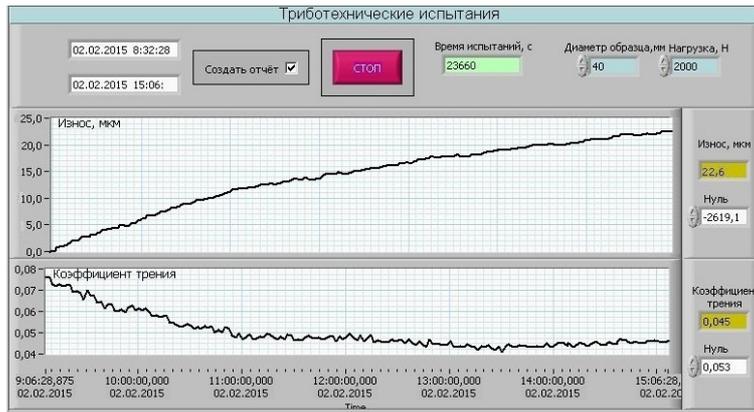
Коэффициент трения на рабочих поверхностях сферических подшипников скольжения, обработанных методом ФПУ, по сравнению со сферическими подшипниками скольжения, изготовленными по базовой технологии, ниже в 2–4 раза.

Применение технологии ФПУ возможно на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления, в частности при изготовлении сферических подшипников скольжения.

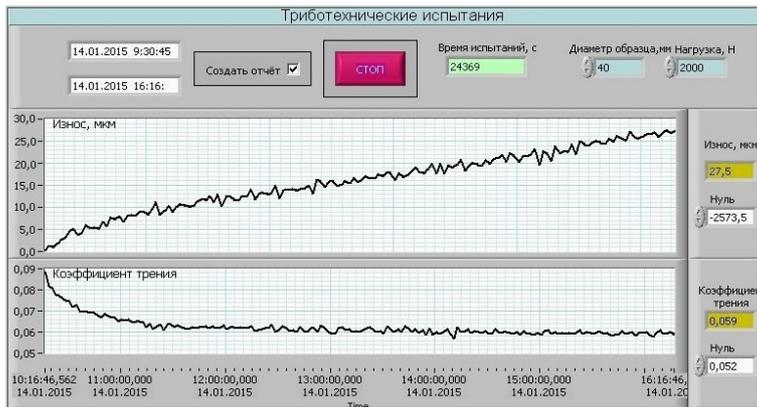
2. Результаты испытаний сферических подшипников скольжения

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для подшипника			
		1	2	3	4
Прирабатываемость	t_0 , ч	2,73	2,23	2,23	2,53
	h_0 , мкм	15,0	14,5	2,0	2,2
	f_0 / f	1,71	1,53	2,31	1,62
Антифрикционность	f	0,045	0,059	0,013	0,021
Износостойкость	h , мкм	22,6	27,5	2,9	3,8
	$I_h \cdot 10^{-10}$	7,69	11,40	0,79	1,52
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	12,46	15,16	1,60	2,09

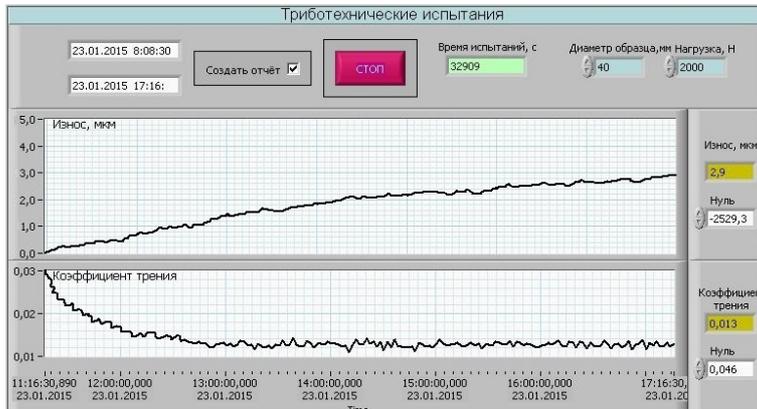
Примечание. Номера подшипников соответствуют табл. 1.



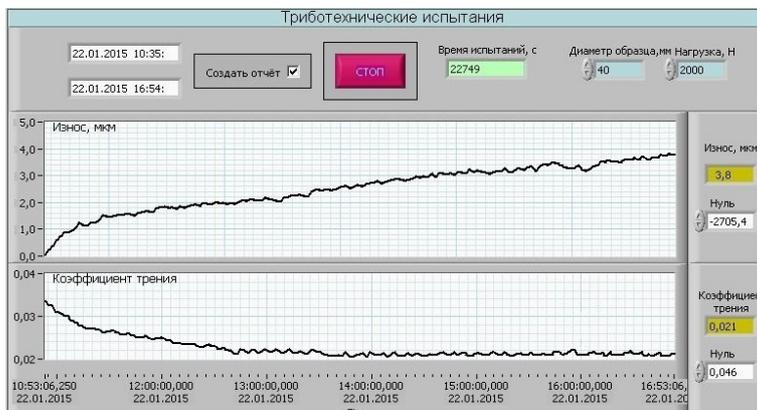
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Результаты испытаний сферического подшипника № 1(а), № 2(б), № 3(в), № 4(г)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горленко, А.О., Шупиков, И.Л., Тополянский, П.А., Тополянский, А.П. Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего покрытия // *Металлообработка*. – 2012. – № 2 (68). – С. 31 – 36.
2. Горленко, А.О. Обеспечение износостойкости поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // *Вестник БГТУ*. – 2007. – №2. – С. 10 – 15.
3. Горленко, А.О. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2007. – №8 – С. 1 – 9.
4. Горленко, А.О. Нормализация триботехнических испытаний для создания базы данных по одноступенчатому технологическому обеспечению износостойкости / А.О. Горленко, М.И. Прудников // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2008. – №9. – С. 7 – 13.
5. Горленко, А.О. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом. Справочник. / А.О. Горленко, М.И. Прудников // *Справочник. Инженерный журнал. Приложение*. – 2009. – № 10. – С. 22 – 24.
6. Сулов, А.Г., Дальский, А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. М.: Машиностроение, 2001. – 684 с.

REFERENCES

1. Gorlenko, A.O., Shupikov, I.L., Topolyansky, P.A., Topolyansky, A.P. Modification of part work surfaces by strengthening coating application // *Metal Processing*. 2012. – № 2 (68). – pp. 31 – 36.
2. Gorlenko, A.O. Wear resistance assurance in friction surfaces by controlled technological effect/ A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // *Bulletin of BSTU*. – 2007. – №2. – pp. 10 – 15.
3. Gorlenko, A.O. Modeling of contact interaction and wear of friction cylindrical surfaces / A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // *Friction and Lubrication in Machinery and Mechanisms*. – 2007. – №8 – pp. 1 – 9.
4. Gorlenko, A.O. Tribotechnical tests normalization for data base creation for wear resistance one-stage technological assurance / A.O. Gorlenko, M.I. Prudnikov // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – №9. – 2008. – pp. 7 – 13.
5. Gorlenko, A.O. Tribotechnical tests of part surfaces by normalized method. Reference Book. / A.O. Gorlenko, M.I. Prudnikov // *Reference Book. Engineering Journal. Appendix*. – 2009. – № 10. – pp. 22 – 24.
6. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Techniques*. M.: Mechanical Engineering, 2001. – pp. 684.

Рецензент д.т.н. А.М. Марков

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 08.06.2016. Подписано в печать 20.07.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7