

УДК 621.9.02

Изменения состояния рабочих поверхностей быстрорежущих инструментов в процессе эксплуатации

А.Е. Древал¹, В.К. Ардисламов²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Департамент Министерства промышленности и торговли РФ, 109074, Москва, Российская Федерация, Китайгородский пр., д. 7

Changes in the Working Surfaces of High-Speed Tools during the Cutting Process

A.E. Dreval¹, V.K. Ardislamov²¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Department of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, 109074, Moscow, Russian Federation, Kitaigorodsky Proezd, Bldg. 7

e-mail: dreval_a@mail.ru



Представлены результаты исследования изменения структурно-фазового состояния, тока экзоэмиссии, микротвердости, а также изменения динамических показателей и термо-ЭДС по мере изнашивания быстрорежущих инструментов в процессе резания. Полученные результаты показывают, что изнашивание инструмента определяется конкурирующим воздействием процессов упрочнения вследствие пластической деформации изнашиваемой поверхности и разупрочнения из-за температурного фактора. Изменения постоянных составляющих динамических показателей и термо-ЭДС резания в ходе изнашивания быстрорежущих инструментов близки к линейным и могут быть использованы в качестве диагностических признаков состояния инструментов.

Ключевые слова: резание металлов, износ инструмента, экзоэмиссия, микротвердость, термический фактор.



The article presents results of the changes in the structurally-phase state, current of exoelectron emission, micro hardness as well as dynamic performance and thermal emf when high-speed tools wear out during the cutting process. The results obtained show that the tool wear is determined by the competing influence of the hardening process due to the plastic deformation and surface softening due to the temperature factor. The changes in the constant components of the dynamic parameters and thermal emf during wear of the high-speed tools are close to linear. They can be used as diagnostic criteria in tool wear monitoring.

Keywords: metal cutting, tool wear, exoelectron emission, micro hardness, thermal factor emf.

Работоспособность быстрорежущих инструментов определяется исходным состоянием рабочих поверхностей и их изменениями под воздействием тепловых и силовых процессов, возникающих при резании.

Состояние рабочих поверхностей режущих инструментов и их изменения оцениваются ря-

дом показателей. Поверхности характеризуются внешними показателями: макрорельефом, видом и топографией изношенных поверхностей, шероховатостью, наличием микротрещин, налипов и других внешних дефектов. Также рабочие поверхности характеризуются структурно-фазовым состоянием, микротвердостью,

наличием остаточных напряжений и другими показателями поверхностного слоя. В процессе резания эти показатели изменяются, что в свою очередь оказывает влияние на ход процесса резания и дальнейшее изнашивание инструмента. Процесс резания сопровождается силовыми, тепловыми, волновыми, эмиссионными и другими проявлениями, которые в техническом приложении используются как диагностические сигналы о ходе процесса и изменении этих показателей.

Выполнено экспериментальное исследование, имеющее целью рассмотреть в комплексе в ходе процесса резания проявления внешнего показателя — износа, а также металлографических, силовых, температурных, эмиссионных показателей для оценки на качественном уровне взаимосвязи между ними.

Представлены результаты исследования состояния изнашиваемой задней поверхности спиральных сверл диаметром $d = 6,8$ мм из быстрорежущей стали Р6М5К5 при сверлении сквозных отверстий глубиной 18 мм в конструкционной стали 45 твердостью $HВ = 185$. Сверла подвергались входному контролю на соответствие техническим требованиям ГОСТ 2034–80, что позволило сформировать партию инструмента объемом $n = 20$ однородного качества.

Изменение структуры поверхностных слоев инструментов оценивалось методами рентгеноструктурного анализа [1, 2] по величине физического уширения дифракционной линии β . Фазовый анализ задних поверхностей сверл выполнялся на дифрактометре ДРОН-3 с использованием Co -излучения периодически по мере увеличения наработки сверлами до отказа.

Изменения энергетического состояния поверхностных слоев оценивались по току экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ) $I_{ЭЭЭ}$ [3, 4]. Измерение тока ЭЭЭ проводилось непосредственно на задних поверхностях сверл в исходном состоянии и по мере наработки на экзоэмиссионной установке. Фотостимуляция эмиссии электронов с изнашиваемой поверхности инструмента осуществлялась ультрафиолетовым излучением в вакуумной камере при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Для измерения момента M_p и осевой силы P_o резания использованы динамометр УДМ-600 и система электронной аппаратуры, термо-ЭДС измерялась методом естественной термопары с использованием цифрового вольтметра ВК-20, оценка формы и величины износа выполнена на микроскопе УИМ-21.

Исходное состояние задних поверхностей спиральных сверл характеризуется рассеиванием параметров структурно-фазового и энергетического состояний. Например, оценки исследуемой структуры задних поверхностей по распределению физического уширения дифракционной линии β и энергетического состояния по распределению тока экзоэлектронной эмиссии $I_{ЭЭЭ}$ показывают удовлетворительное согласование распределений с законом Гаусса с коэффициентами вариации: для линии β $var_{\beta} = 0,12$, для тока ЭЭЭ $var_I = 0,26$.

Для спиральных сверл характерным является преимущественный износ задних поверхностей [5]. Изменения физического уширения дифракционной линии β , износа инструмента h_3 и температурно-силовых показателей (M_p , P_o , E), которые могут выступать в качестве диагностических признаков хода процессов обработки, показаны на рис. 1.

Трансформация структуры поверхностных слоев задних поверхностей сверла в процессе резания определяется конкурирующим воздействием процессов упрочнения вследствие пластической деформации и разупрочнения из-за температурного фактора. Период приработки сопровождается упрочнением поверхностного слоя и снижением интенсивности изнашивания. Этот период характеризуется структурной приспособляемостью, перестройкой исходной структуры поверхностного слоя в новую упрочненную фазу, проявляющуюся в образовании вторичных структур, изменяющих механизм контактных процессов. При дальнейшей эксплуатации инструмента наблюдается снижение физического уширения линии β , что

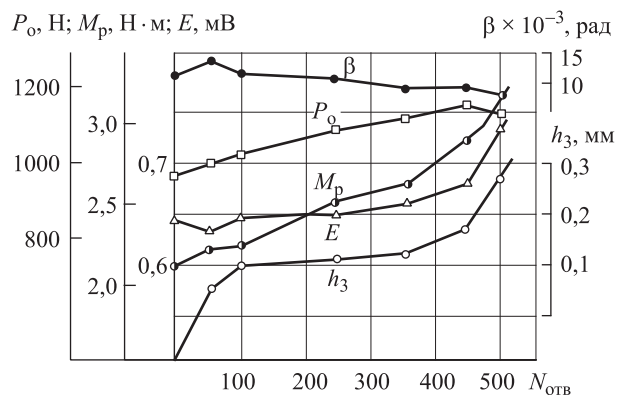


Рис. 1. Изменение износа h_3 , физического уширения дифракционной линии β , момента M_p , осевой силы P_o и термо-ЭДС E от наработки (сверло $d = 6,8$ мм, Р6М5К5, сталь 45, $v = 13,2$ м/мин, $S_o = 0,14$ мм/об)

свидетельствует о развитии процессов рекристаллизации, приводящих к снижению прочностных свойств поверхностного слоя, повышению его пластичности и, следовательно, склонности к смятию и срезу. Это приводит к интенсификации изнашивания. При варьировании параметров режима резания характер зависимости $\beta = f(N)$ сохраняется.

Изменяется и энергетическое состояние изнашиваемых поверхностей с ростом наработки, оцениваемое по току экзоэлектронной эмиссии, что показано на рис. 2.

Резкое увеличение тока ЭЭЭ в начальный период обработки соответствует процессу структурной приспособляемости материала поверхностного слоя задней поверхности к условиям трения и отражает интенсивное нарастание износа инструмента. С уменьшением интенсивности изнашивания в период нормального износа инструмента наблюдается снижение тока ЭЭЭ и сохранение его на постоянном уровне. Критическое состояние инструмента, характеризующееся повышением интенсивности его изнашивания, сопровождается увеличением тока ЭЭЭ. Переменная составляющая термо-ЭДС (E_{var} — размах сигнала) в период приработки уменьшается, затем стабилизируется и остается на постоянном уровне до наступления критического изнашивания, при котором также увеличивается. Характер изменения E_{var} идентичен изменению износа от наработки. Сопоставление E_{var} с изменениями тока ЭЭЭ показывает, что начиная с определенной наработки инструмента ($N = 100$ отв.) эти зависимости имеют аналогичный характер.

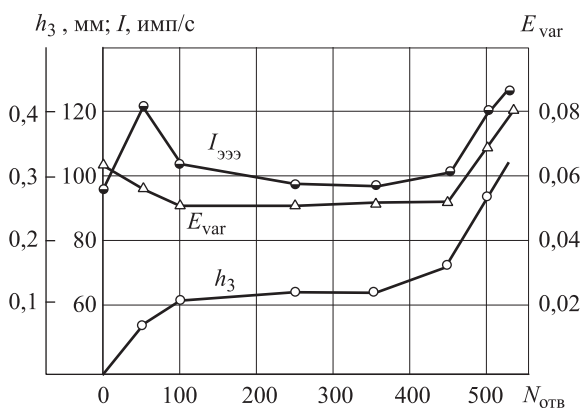


Рис. 2. Изменение износа h_3 , тока экзоэмиссии $I_{ЭЭЭ}$, переменной составляющей термо-ЭДС E_{var} от наработки (сверло $d = 6,8$ мм, Р6М5К5, сталь 45, $v = 13,2$ м/мин, $S_0 = 0,14$ мм/об)

На рис. 1 приведены графики изменения постоянных составляющих динамических показателей и термо-ЭДС в процессе сверления. Изменение момента резания M_p носит возрастающий характер. Термо-ЭДС в период приработки уменьшается, затем наблюдается ее монотонный рост. Значение осевой силы P_0 возрастает, достигает максимальной величины, после чего несколько снижается к моменту начала критического изнашивания сверла по задней поверхности. Изменения переменных составляющих M_{pvar} , P_{ovar} , E_{var} представлены на рис. 3. Для M_{pvar} и P_{ovar} они увеличиваются по мере роста износа и наработки сверла. Переменная составляющая термо-ЭДС в период приработки уменьшается, затем стабилизируется и остается на постоянном уровне до начала критического изнашивания, при котором также резко увеличивается. Характер изменения E_{var} идентичен изменению интенсивности изнашивания I_h от наработки.

Для обоснования общности процессов, происходящих при изнашивании инструментов из быстрорежущих сталей, и перехода от одного вида обработки резанием к другому выполнено моделирование условий обработки сверления на операции точения с использованием методов теории подобия [6].

Согласно теории подобия явлений, необходимым и достаточным является подобие условий однозначности и равенства критериев, составленных из величин, входящих в состав условий однозначности, к которым относятся: 1) геометрические характеристики; 2) термомеханические свойства обрабатываемого и ин-

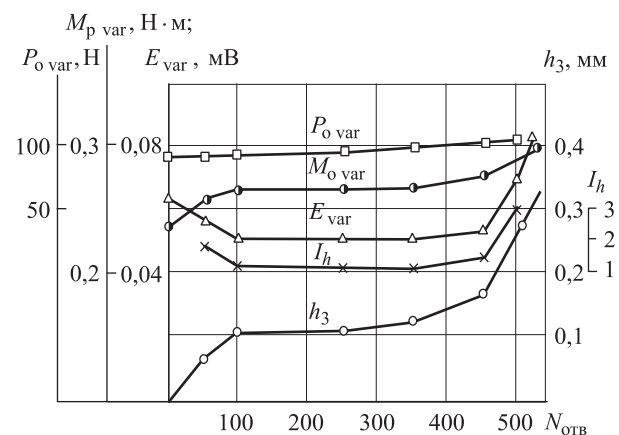


Рис. 3. Изменение износа h_3 , интенсивности изнашивания I_h , переменных составляющих момента M_{pvar} , осевой силы P_{ovar} и термо-ЭДС E_{var} от наработки (сверло $d = 6,8$ мм, Р6М5К5, сталь 45, $v = 13,2$ м/мин, $S_0 = 0,14$ мм/об)

струментального материала; 3) граничные условия, к которым относятся законы распределения касательных напряжений в зоне резания и интенсивности тепловых потоков, определяемые, в свою очередь, параметрами резания v, S, t и другими параметрами; 4) начальные условия.

С использованием рекомендаций [6] определены элементы режима резания и геометрические параметры резца при точении стали 45 твердостью HB = 185, рассчитанные из условия равенства критериев подобия (расчет критериев из-за вспомогательного характера не приводится). Установлены следующие значения: параметры режима резания — скорость резания $v = 12$ м/мин, подача $S = 0,10$ мм/об, глубина $t = 0,5$ мм; геометрические параметры резцов — главный угол в плане $\phi = 60^\circ$, вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 15^\circ$, главный задний угол $\alpha = 12^\circ$, передний угол $\gamma = 10^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$, радиус вершины $r = 0,1$ мм, радиус округления режущей кромки $\rho = 0,05$ мм.

Эксперименты точения выполнены на базе станка 16K20, использованы контрольные и измерительные средства и аппаратура, указанные выше. В ходе экспериментов исследовались изменения износа задней поверхности резца из P6M5K5, физического уширения дифракционной линии β , динамических показателей и термо-ЭДС процесса резания. Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 4, показывают сходство зависимостей при точении с зависимостями, полученными при обработке спиральными сверлами. Это дает основание предполагать, что оба процесса обладают общими закономерностями изменения структурных характеристик поверхностного слоя. Отличия носят только количественный характер. В обоих случаях изменение физического уширения линии β имеет идентичный характер и отражает конкурирующее взаимодействие упрочняющих и разупрочняющих процессов.

Аналогичные данные, полученные при исследовании работоспособности инструментов из других марок быстрорежущих сталей, дополнительно подтверждают представленные закономерности изменения состояния поверхностных слоев инструментов [7].

Характер изменения динамических показателей $P_z = f(L)$ при точении и $M_p = f(N)$ при сверлении, а также термо-ЭДС при точении

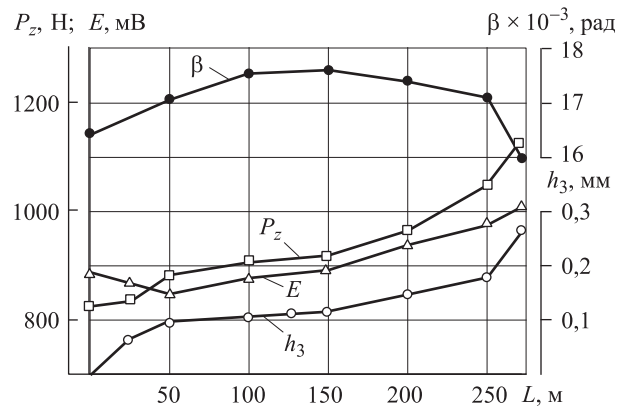


Рис. 4. Изменение износа h_3 , физического уширения дифракционной линии β , главной составляющей силы резания P_z , термо-ЭДС E от наработки (точение: резец P6M5K5, $\phi = 60^\circ$, $\phi_1 = 15^\circ$, $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, сталь 45, $v = 12$ м/мин, $S_0 = 0,1$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

$E = f(L)$ и при сверлении $E = f(N)$ имеют одинаковый характер и могут быть описаны одними и теми же уравнениями, но с различными значениями коэффициентов.

Микротвердость изношенной поверхности инструмента также претерпевает изменения по мере роста наработки. Распределение микротвердости по глубине изучено на наклонных шлифах. Результаты исследования изменений микротвердости поверхностного слоя изношенной поверхности по мере наработки на примере точения стали 45 резцом из P6M5K5 при скорости резания $v = 12$ м/мин, подаче $S = 0,10$ мм/об, глубине резания $t = 0,5$ мм представлены на рис. 5. Микротвердость на поверхности при любой степени износа инструмента максимальна и изменяется по глубине поверхностного слоя в пределах 0,2...0,3 мм. Распре-

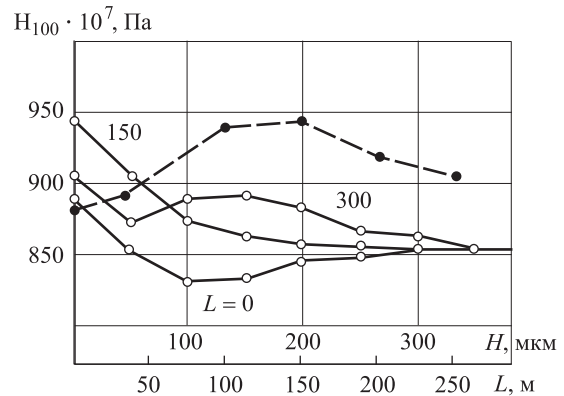


Рис. 5. Изменение микротвердости по задней поверхности (—●—) и по глубине поверхностного слоя задней поверхности (—○—) при различной наработке

деление микротвердости по глубине поверхностного слоя имеет сложный характер и зависит от величины наработки (износа инструмента). В исходном состоянии при $L = 0$ м, $h_3 = 0$ распределение микротвердости имеет убывающий характер до глубины $H = 0,1$ мм и возрастающий до микротвердости основного материала на глубине $H = 0,2$ мм. С увеличением наработки $L = 150$ м, $h_{31} > 0$ микротвердость плавно убывает по глубине и при $H = 0,2$ мм достигает микротвердости основного материала. Дальнейший рост наработки $L = 300$ м, $h_{32} > h_{31}$ приводит к снижению микротвердости в зоне глубиной $0,08$ мм, что может быть объяснено повышением тепловыделения из-за увеличения износа и развитием перенаклепа. На глубине $H = 0,08...0,20$ мм наблюдается зона, в которой сохраняется эффект первоначального упрочнения. На глубине $H = 0,20...0,30$ мм наблюдается зона разупрочнения до микротвердости основного материала.

На рис. 5 видно, что упрочнение поверхностного слоя сменяется постепенным раз-

упрочнением, что подтверждает результаты изменения физического уширения дифракционной линии β .

Выводы

Моделирование процесса резания точением и сравнение его результатов со сверлением показывает, что закономерности трансформации структурного и энергетического состояния поверхностных слоев — общие и характерные по мере изнашивания быстрорежущих инструментов, они являются следствием конкурирующих процессов упрочнения в результате пластической деформации и разупрочнения из-за действия температур; постоянные составляющие динамических показателей и термо-ЭДС не отражают изменений состояния поверхностного слоя изнашиваемой поверхности, однако реагируют на изменение величины износа и могут быть использованы для оценки (диагностики) состояния инструмента.

Литература

- [1] Мурзин С.П., Трегуб В.И. Оценка уровня внутренних напряжений в приповерхностном слое нанопористых металлических материалов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2011, т. 13, № 4, с. 91–95.
- [2] Сатдарова Ф.Ф., Козлов Д.А. Автоматизированная система исследований дислокационной структуры материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2008, т. 74, № 9, с. 26–31.
- [3] Назаров Ю.Ф., Шкилько А.М., Тихоненко В.В., Компанец И.В. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов. *Физическая инженерия поверхности*, 2007, т. 5, № 3–4, с. 207–216.
- [4] Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. Исследование состояния поверхности металлорежущего инструмента методом экзoeлектронной эмиссии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2011, т. 77, № 10, с. 26–29.
- [5] Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 10, URL: <http://technomag.edu.ru/doc/250866.html> (дата обращения 10 мая 2015).
- [6] Силин С.С. *Метод подобия при резании металлов*. Москва, Машиностроение, 1979. 152 с.
- [7] Древаль А.Е., Ардисламов В.К., Кривошей В.М., Гайнулин М.Р. Кинетика состояния поверхностных слоев быстрорежущего инструмента в процессе его изнашивания. Оптимизация процесса резания жаро- и особо прочных материалов. *Всероссийский тематический межвузовский сборник*, Уфа, 1989, с. 132–138.

References

- [1] Murzin S.P., Tregub V.I. Otsenka urovnia vnutrennikh napriazhenii v pripoverkhnostnom sloe nanoporistikh metallicheskih materialov [Estimation of level of internal pressure in near-surface a layer nanoporous the metal materials]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsen-*

- tra Rossiiskoi akademii nauk* [Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2011, vol. 13, no. 4, pp. 91–95.
- [2] Satdarova F.F., Kozlov D.A. Avtomatizirovannaia sistema issledovaniia dislokatsionnoi struktury materialov [Automated System for Analysis of the Dislocation Structure in Polycrystals]. *Zavodskaiia laboratoriiia. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory]. 2008, vol. 74, no. 9, pp. 26–31.
- [3] Nazarov Iu.F., Shkil'ko A.M., Tikhonenko V.V., Kompaneets I.V. Metody issledovaniia i kontroliia sherokhovatosti poverkhnosti metallov i splavov [Methods of investigation and control of surface roughness of metals and alloys]. *Fizicheskaia inzheneriia poverkhnosti* [Physical Surface Engineering]. 2007, vol. 5, no. 3–4, pp. 207–216.
- [4] Mokritskii B.Ia., Burkov A.A. Issledovanie sostoiianiia poverkhnosti metallorzhushchego instrumenta metodom ekzoelektronnoi emissii [Study of the Surface of Metal Cutting Tool Using Exoelectron Emission]. *Zavodskaiia laboratoriiia. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory]. 2011, vol. 77, no. 10, pp. 26–29.
- [5] Dreval' A.E., Ragrin N.A., Samsonov V.A. Formirovanie otkazov spiral'nykh sverl v usloviakh avtomatizirovannogo proizvodstva [Spiral Drills Failure Generation in Automated Operation]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. BMSTU]. 2011, no. 10, Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/250866.html> (accessed 10 May 2015).
- [6] Silin S.S. *Metod podobiia pri rezanii metallov* [Method of similarity for metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 152 p.
- [7] Dreval' A.E., Ardislamov V.K., Krivoshei V.M., Gainulin M.R. Kinetika sostoiianiia poverkhnostnykh sloev bystrorezhushchego instrumenta v protsesse ego iznashivaniia. Optimizatsiia protsessa rezaniia zharo- i osobo prochnykh materialov [Kinetics of surface layers of high-speed tools in the process of wear. Optimization of the process of cutting and heat-especially strong materials]. *Vsesoiuznyi tematicheskii mezhvuzovskii sbornik* [Union Inter-university thematic collection]. Ufa, 1989, pp. 132–138.

Статья поступила в редакцию 11.06.2015

Информация об авторах

ДРЕВАЛЬ Алексей Евгеньевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dreval_a@mail.ru).

АРДИСЛАМОВ Виль Камильевич (Москва) — заместитель директора. Департамент Министерства промышленности и торговли РФ (109074, Москва, Российская Федерация, Китайгородский пр., д. 7).

Information about the authors

DREVAL Aleksey Evgenievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Tools and Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: dreval_a@mail.ru).

ARDISLAMOVI Vil Kamilievich (Moscow) — Deputy Director. Department of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (109074, Moscow, Russian Federation, Kitaigorodsky Proezd, Bldg. 7).