

Анализ влияния параметров абразивного инструмента на объем свободного межзернового пространства при шлифовании древесины и древесных материалов

И.И. Костюков^a, А.А. Федяев^b, А.В. Сергеевичев^c, М.А. Дедерер^d

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер. 5, литера У, Санкт-Петербург, Россия

^a spb.kostyukov@mail.ru, ^b art_fedyaev@mail.ru, ^c 910sav@gmail.com, ^d sp1kexx89@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8036-7432>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1589-0734>

Статья поступила 02.12.2024, принята 03.02.2025

Преимуществом абразивной обработки является безусловное обеспечение ее качества без сколов, вырывов и отщепов, свойственных процессу фрезерования. Кроме того, абразивные инструменты не надо затачивать, как режцовый инструмент, они легко устанавливаются на рабочих органах станков, отличаются безопасностью и производят при работе меньше шума. Процессы поверхностной и размерной абразивной обработки одинаковы по содержанию при установившихся условиях. Однако поскольку в практике имеют место изменяющиеся во времени условия, т. е. непостоянство механических и физических свойств материала, припуска на обработку (глубины шлифования), изменения режущей способности абразива по мере его затупления или засаливания, то единый, по существу, процесс шлифования древесины распадается на два технологически разных направления. В данном процессе абразивные зерна снимают с обрабатываемой поверхности стружку, которая размещается в пространстве между ними. Свободное межзерновое пространство имеет ограниченный объем, поэтому в нем может разместиться ограниченное количество стружки. Переполнение межзернового пространства стружкой приводит к засаливанию абразивного инструмента, его ускоренному износу, прижугу обрабатываемой поверхности и снижению работоспособности шлифовального инструмента. Следовательно, объем межзернового пространства играет крайне важную роль в процессе шлифования древесины и древесных материалов. При этом он прямо пропорционален зернистости инструмента и не зависит от материала основы. На основании исследования изменения объема свободного межзернового пространства по мере износа абразивного инструмента представлена кривая износа шлифовальных шкурок при жестком шлифовании. Показано, что при жестком шлифовании с постоянной скоростью подачи степень заполнения межзернового пространства увеличивается по мере износа абразивного инструмента, а материал основы на объем свободного межзернового пространства влияния не оказывает.

Ключевые слова: шлифование, древесина, древесные материалы, абразивный инструмент, межзерновое пространство.

Analysis of the influence of abrasive tool parameters on the volume of free intergranular space when grinding wood and wood materials

I.I. Kostyukov^a, A.A. Fedyaev^b, A.V. Sergeevichev^c, M.A. Dederer^d

Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Ave., St. Petersburg, Russia

^a art_fedyaev@mail.ru, ^b spb.kostyukov@mail.ru, ^c 910sav@gmail.com, ^d sp1kexx89@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8036-7432>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1589-0734>

Received 02.12.2024, accepted 03.02.2025

The advantage of abrasive processing is the unconditional support of its quality without chips, breaks and flakes characteristic of the milling process. In addition, abrasive tools do not need to be sharpened as a cutting tool, they are easily installed on the working bodies of machine tools, differ in safety and produce less noise when working. The processes of surface and dimensional abrasive treatment are the same in content under established conditions. However, since in practice there are conditions that are changing in time, that is, the inconsistency of the mechanical and physical properties of the material, the allowance for processing (depth of grinding), changes in the cutting ability of an abrasive as it is blunt or greasy, the unified, in essence, the process of plugging wood decomposes into two technologically different directions. In this process, abrasive grains are removed from the surface to be treated, which is placed in the space between them. The free intergranular space has a limited volume, so it can accommodate a limited amount of chips. Overfilling the intergranular space with chips leads to clogging of the abrasive tool, its accelerated wear, scorching of the surface being processed, and a decrease in the performance of the grinding tool. Consequently, the volume of the intergranular space plays an extremely important role in the process of grinding wood and wood materials. The volume of free intergranular space of an abrasive tool is directly proportional to its grain size and does not depend on the base material. Based on the study of changes in the volume of free intergranular space as the abrasive tool wears, a wear curve of abrasive skins during hard grinding is presented. It is shown that during hard grinding with

a constant feed rate, the degree of filling of the intergranular space increases as the abrasive tool wears, and the base material does not affect the volume of free intergranular space.

Keywords: grinding, wood, wood materials, abrasive tool, intergranular space.

Введение. В технологии размерно-формообразования деталей различают поверхностную и размерную обработку. Первая из них выполняется с целью получения на детали поверхности заданной микрогеометрии или для получения заданного размера детали. Выравнивание поверхности плиты до состояния геометрической плоскостности или создание гладкой поверхности представляют собой задачи поверхностной обработки, а калибрование щита на строго заданную толщину – размерной [1–4].

Преимуществом абразивной обработки является безусловное обеспечение качества без сколов, вырывов и отщепов, свойственных процессу фрезерования. Кроме того, абразивные инструменты не надо затачивать, как резцовый инструмент, они легко устанавливаются на рабочих органах станков, отличаются безопасностью и производят при работе меньше шума [5, 6].

К недостаткам абразивного калибрования относится повышенный расход энергии и низкая производительность по сравнению с лезвийным инструментом [7–9].

Процессы поверхностной и размерной абразивной обработки одинаковы по содержанию при установившихся условиях. Однако поскольку в практике имеют место изменяющиеся во времени условия, т. е. непостоянство механических и физических свойств материала, припуска на обработку (глубины шлифования), изменения режущей способности абразива по мере его затупления или засаливания, то единый, по существу, процесс шлифования древесины распадается на два технологически разных направления: жесткое шлифование с точно обусловленным направлением обработки и эластичное с недостаточно ориентированным направлением [10–12].

В первом случае жесткость обработки достигается путем неизменного зазора внутри базы до инструмента при отсутствии зависимости от глубины резания и механических показателей свойств материала [13–15].

При эластичном шлифовании сохраняется условное постоянство давления и глубины резания при переменных условиях за счет смещения инструмента или базы. Эластичное шлифование обеспечивает в известной мере копирование первоначальной поверхности и, следовательно, не может обеспечить точной обработки за один проход [16].

Таким образом, получение точных размеров и формы обрабатываемой детали из древесины возможно только при жестком шлифовании.

Методы и средства исследований. В процессе шлифования абразивные зерна снимают с обрабатываемой поверхности стружку, часть которой застревает в пространстве между зерен. Свободное межзерновое пространство имеет ограниченный объем, поэтому в нем может разместиться ограниченное количество стружки. Переполнение межзернового пространства стружкой приводит к засаливанию абразивного инструмента, его ускоренному износу, прижегу обрабатываемой поверхности и снижению работоспособности

шлифовального инструмента. Следовательно, объем межзернового пространства играет крайне важную роль в процессе шлифования древесины и древесных материалов [17–20].

Критерием объема свободного межзернового пространства принято считать объем межзернового пространства 1 см² абразивного инструмента v_c , см³.

Количество древесины, сошлифованное 1 см² абразивного инструмента на пути, который равен длине контакта, представляет собой циклическую производительность абразивного инструмента $A_{ц}$, см³ [12, 13, 15].

Критерием степени заполнения межзернового пространства стружкой является отношение циклической производительности абразивного инструмента к объему свободного межзернового пространства 1 см² шкурки в процентах [4]:

$$\sigma = \frac{A_{ц}}{v_c} 100 \% \quad (1)$$

Объем свободного межзернового пространства определялся опытным путем, по методике, изложенной в работах научных исследователей [18–20], как разность геометрического v_r и физического v_{ϕ} объемов абразивного инструмента с учетом пористости основы П. Геометрический объем прямоугольного отрезка шкурки равен произведению толщины шкурки на ширину и длину.

$$v_r = H_{ш} \cdot B \cdot l$$

Толщина шкурки измеряется при помощи микрометра. Длина и ширина замеряются измерительной линейкой. Физический объем отрезка абразивного инструмента измеряется на лабораторной измерительной установке.

При известных v_r , v_{ϕ} и П объем свободного межзернового пространства равен:

$$v_c = v_r - v_{\phi} - П \quad (2)$$

Влияние зернистости абразивного инструмента на объем свободного межзернового пространства.

В ходе работы были исследованы абразивные шкурки зернистостью от Р180 до Р24 на тканевой основе с плотной насыпкой абразивных зерен. Размеры образцов для исследования: 90x300 мм.

По данным экспериментов построен график зависимости объема свободного межзернового пространства и объема пор основы от зернистости абразивного инструмента (рис. 1).

При анализе графика можно сделать вывод, что с увеличением зернистости абразивного инструмента объем свободного межзернового пространства и пор основы растет. Данная зависимость является прямо пропорциональной и графически представляет собой прямую линию, которая не проходит через начало координат и пересекает ось ординат выше нуля.

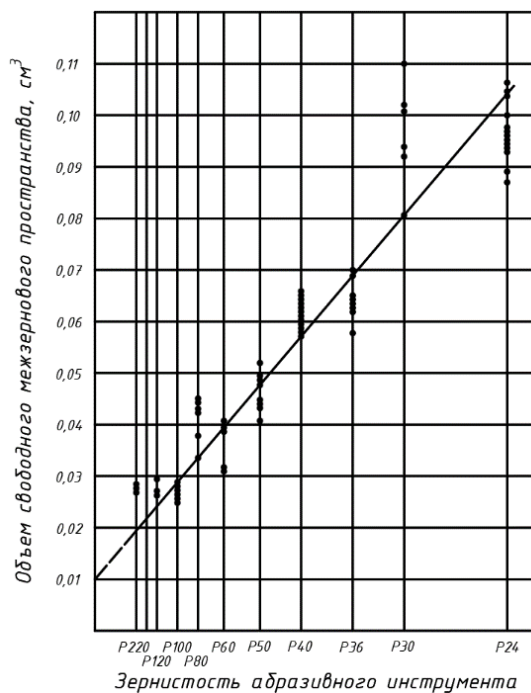


Рис. 1. Зависимость объема свободного межзернового пространства абразивного инструмента от его зернистости

Данная ситуация объясняется следующим образом: при зернистости равной нулю, т. е. если основа покрыта связующим материалом без зерен, объем межзернового пространства также равен нулю. Следовательно, точка пересечения прямой с осью ординат показывает величину пористости основы.

В результате обработки экспериментальных данных установлена корреляционная связь между зернистостью абразивного инструмента и объемом свободного межзернового пространства и пор основы. Данная связь выражается линейным корреляционным уравнением:

$$v_r - v_\phi = 0,0094 + 0,00116z, \quad (3)$$

где z — зернистость абразивного инструмента.

Из уравнения видно, что объем пор основы из ткани 1 см^2 абразивной шкурки равен $0,0094 \text{ см}^3$.

Следовательно, объем свободного межзернового пространства можно вычислить по формуле:

$$v_c = 0,00116z$$

Для более точного расчета объема свободного межзернового пространства необходимо учесть влияние других факторов:

$$v_c = 0,00116 \cdot z \cdot a_n \cdot a_{пл}, \quad (4)$$

где a_n — коэффициент, учитывающий метод насыпки абразивных зерен (при механической насыпке $a_n = 1,0$; при электростатическом нанесении $a_n = 2,0$); $a_{пл}$ — коэффициент, учитывающий плотность насыпки абразивных зерен (при плотной насыпке $a_{пл} = 1,0$; при 70 % -й насыпке $a_{пл} = 1,25$ [6, 8, 9]).

Влияние износа абразивного инструмента на объем свободного межзернового пространства. Экспериментальные исследования проводились при жестком шлифовании абразивным инструментом цилиндрической формы. Эксперименты выполнялись при следующих условиях: скорость резания 21 м/с , скорость подачи 8 м/мин , глубина резания $0,26 \text{ мм}$, угол подачи 90° . Обрабатывались образцы из древесины дуба размером $80 \times 20 \times 12 \text{ мм}$ вдоль волокон. Шлифование производилось абразивной шкуркой зернистостью P50 на тканевой основе.

Образец шкурки натягивался и закреплялся на шлифовальном цилиндре. После сошлифовывания $0,05 \text{ см}^3$ древесины шкурка снималась и производился первый замер объема межзернового пространства.

Далее замеры производились после снятия новым образцом шкурки $0,1 \text{ см}^3$ древесины, а затем после снятия $0,15$; $0,20$; $0,25 \text{ см}^3$ и так далее до полного износа абразивного инструмента. Критерием полного износа абразивного инструмента является прижег большей части обрабатываемой поверхности.

Графически изменение объема свободного межзернового пространства от износа шкурки по результатам экспериментов представлено на рис. 2.

При анализе графика можно видеть, что по мере износа абразивного инструмента объем свободного межзернового пространства уменьшается. При полном износе шкурки объем свободного межзернового пространства уменьшился на 29 %. Изменение v_c в этом случае можно объяснить обламыванием, вырыванием из связки и истиранием абразивных зерен, а также засаливанием абразивного инструмента в процессе работы. Засаливание заключается в прилипанию и защемлении древесных стружек в межзерновом пространстве шкурки.

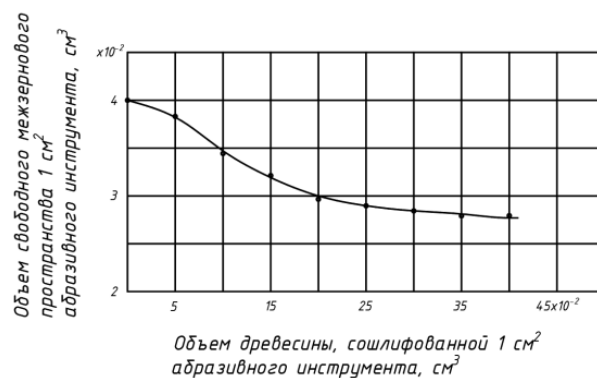


Рис. 2. Изменение объема свободного межзернового пространства по мере износа абразивного инструмента при жестком шлифовании

С целью определения степени влияния этих факторов в различные периоды работы абразивного инструмента на изменение v_c по результатам вышеописанных экспериментов были построены дополнительные графики зависимости толщины и физического объема шкурки от степени ее износа. Истирание, обламывание и вырывание зерен из связки проявляется в уменьшении толщины шкурки и уменьшении ее физического

объема. При анализе дополнительных графиков можно видеть, что процесс уменьшения толщины шкурки, а, следовательно, обламывание, истирание и вырывание абразивных зерен из связки, наиболее активно происходит в начальный период работы абразивного инструмента, в дальнейшем данный процесс стабилизируется. При полном износе толщина шлифовальной шкурки уменьшилась на 23 %.

Процесс засаливания также изменяет физический объем абразивного инструмента, а именно увеличивает его. Анализ графика показывает изменение физического объема абразивного инструмента по мере его износа. В начальный период работы v_f резко уменьшается, затем процесс стабилизируется, и физический объем остается постоянным, а в конце работы резко увеличивается. Данная ситуация возникает из-за того, что в начальной стадии работы абразивного инструмента преобладает процесс вырывания плохо закрепленных абразивных зерен, их обламывания и истирания. Затем наступает период стабилизации физического объема абразивного инструмента, когда его уменьшение в результате затупления и вырывания зерен компенсируется увеличением в результате засаливания. В дальнейшем преобладает процесс засаливания, который и приводит к быстрому росту физического объема абразивного инструмента.

В результате анализа графика, представленного на рис. 2, зависимость объема свободного межзернового пространства от степени износа абразивного инструмента можно объяснить следующим образом. Более пологий ход кривой в начальный период работы абразивного инструмента объясняется тем, что процесс увеличения v_c в результате вырывания слабо закрепленных зерен в какой-то степени компенсируется процессом уменьшения v_c в результате обламывания и истирания зерен. После сошлифовывания $0,05 \text{ см}^3$ древесины процесс вырывания абразивных зерен из связки почти прекращается, и наряду с затуплением абразивных зерен происходит засаливание шлифовальной шкурки, что приводит к резкому уменьшению v_c . В дальнейшем засаливание играет все возрастающую роль в уменьшении объема свободного межзернового пространства шкурки. В конечной стадии износа абразивного инструмента v_c стремится к стабилизации, так как под влиянием сил резания налипшая древесная стружка в некоторых местах отрывается от шкурки, что в какой-то степени компенсирует засаливание.

Так как объем свободного межзернового пространства абразивного инструмента в связи с износом уменьшается, то при постоянной скорости подачи степень заполнения свободного межзернового пространства при этом растет (рис. 3). При полном износе абразивного инструмента степень заполнения свободного межзернового пространства увеличилась на 40 %.

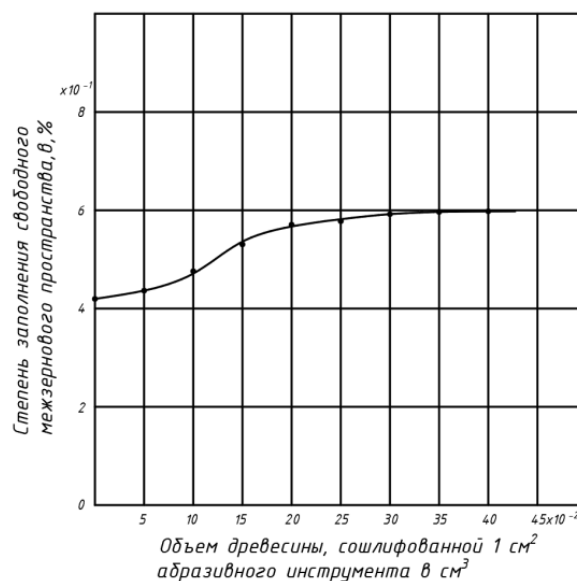


Рис. 3. Изменение степени заполнения свободного межзернового пространства стружкой по мере износа абразивного инструмента при жестком шлифовании.

Определение влияния материала основы абразивного инструмента на объем свободного межзернового пространства. Эксперименты проводились на шлифовальных шкурках с бумажной основой зернистостью P36, P40, P60 и P120 плотной насыпки, которая осуществлялась электростатическим способом, материал зерен — электрокорунд.

На основании проведенных экспериментов и обработки полученных данных построен график зависимости объема свободного пространства и объема пор основы от зернистости шкурки на бумажной основе (рис. 4). Также проведена расчетная прямая для шкурок с тканевой основой. Из графика видно, что суммарный объем свободного межзернового пространства и пор основы шкурки для всех номеров зернистости больше у шкурок с тканевой основой.

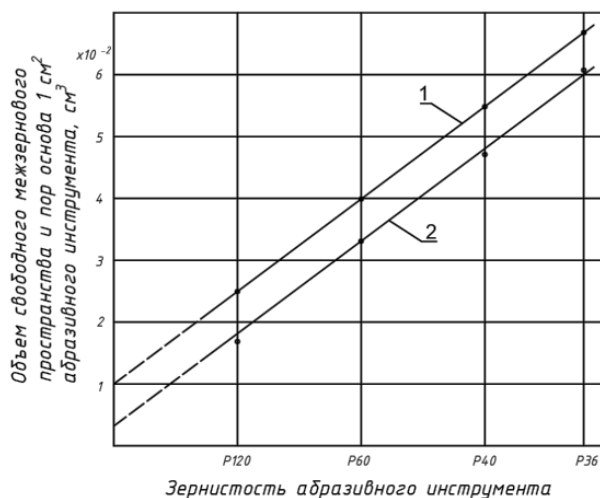


Рис. 4. Влияние материала основы шкурки на объем свободного межзернового пространства: 1 — прямая для шкурок на тканевой основе; 2 — прямая для шкурок на бумажной основе.

Прямые 1 и 2 параллельны друг другу и их уравнения отличаются только величиной постоянного коэффициента. Эти коэффициенты представляют собой объемы пор основы. Для бумажной основы, по данным эксперимента, $P = 0,024 \text{ см}^3$.

Следовательно, материал основы на объем свободного межзернового пространства влияния не оказывает. **Заключение.** На основании проведенных экспериментальных исследований и обработки полученных данных, можно сделать вывод, что объем свободного межзернового пространства абразивного инструмента пря-

мо пропорционален его зернистости и не зависит от материала основы.

В результате исследования изменения объема свободного межзернового пространства по мере износа абразивного инструмента представлена кривая износа шлифовальных шкур при жестком шлифовании.

Показано, что при жестком шлифовании с постоянной скоростью подачи степень заполнения межзернового пространства увеличивается по мере износа абразивного инструмента.

Литература

1. Виноградов В., Сорокин Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1995. 224 с.
2. Гришкевич А.А., Костюк О.И. Увеличение периода эксплуатации шлифовального инструмента при обработке древесины // Машиностроение и машиноведение. Барановичи: Изд-во Баранович. гос. ун-та, 2015. № 3. С 17-21.
3. Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization // Journ. of Materials Processing Technology, 2008. Vol. 208, iss. 1-3. P. 14-23.
4. Sergeevichev A., Belonogova N., Sergeevichev V., Byzov V., Mikhailova A. Investigation of the influence of certain factors on the quality of processing during hard grinding // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 5th Pan-Russian Scientific Technical Conference on Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education. Vol. 574(1). St. Petersburg: State Forest Technical University. FR. IOP Publishing Ltd., 2020. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012072
5. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента. СПб: Изд-во «ГЕРДА», 2006. 40 с.
6. Санев В.И., Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Резание древесины и древесных материалов. СПб.: «Лань», 2018. 384 с.
7. Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Дереворежущий инструмент. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2013. 330 с.
8. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1984. 142 с.
9. Переладов А.Б., Камкин И.П. Определение режима изнашивания инструмента при шлифовании // Изв. Волгоград. гос. технич. ун-та. 2015. № 3. С. 24-29.
10. Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А. Исследование производительности шлифования абразивным инструментом с самозатачивающимся зерном // Вестн. Тамбов. гос. технич. ун-та. 2012. Т. 18, № 4. С.1031-1037.
11. Brinksmeier E. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2006. Vol. 55, ch. 2. P. 667-696. DOI:10.1016/j.cirp.2006.10.003
12. Cai G., Feng B., Jin T., Gong Y. Study on the friction coefficient in grinding // Journ. of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 129. P. 25-29.
13. Carrano A.L., Taylor J.B. Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. // Journ. of Manufacturing Processes. 2005. Vol. 7, ch. 1. P. 17-27.
14. Островский В.И., Савицкая В.Г. Кинематический анализ процесса шлифования. М.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1987. 153 с.
15. Сергеевичев А.В. Анализ разрушения абразивных зерен при шлифовании древесины и древесных материалов // Лесн. журнал. 2015. № 5. С. 117-125.
16. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.
17. Силин С., Леонов Б. Оптимизация технологии глубинного шлифования. М.: Изд-во, 1992. 120 с.
18. Братан С. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании // Мат-лы междунар. науч. конф. Донбасс. гос. технич. ун-та «Современные технологии и системы механической обработки древесины». Донецк: Изд-во Донбасс. гос. технич. ун-та, 2000. С. 24-32.
19. Новоселов Ю.И. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Севастополь. гос. ун-та, 2012. 304 с.
20. Хромчак И. Абразивная обработка плитных материалов на минеральных вяжущих. Львов: Изд-во Львов. лесотехнич. ун-та, 1996. 47 с.

References

1. Vinogradov V., Sorokin G. Abrasive wear. M.: Mashinostroenie, 1995. 224 p.
2. Grishkevich A.A., Kostyuk O.I. Baranovich: Publishing house of Baranovich state university, 2015. № 3. P. 17-21.
3. Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization // Journ. of Materials Processing Technology, 2008. Vol. 208, iss. 1-3. P. 14-23.
4. Sergeevichev A., Belonogova N., Sergeevichev V., Byzov V., Mikhailova A. Investigation of the influence of certain factors on the quality of processing during hard grinding // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 5th Pan-Russian Scientific Technical Conference on Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education. Vol. 574(1). St. Petersburg: State Forest Technical University. FR. IOP Publishing Ltd., 2020. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012072
5. Kalinin E.P. Theory and practice of abrasive processing performance management taking into account instrument darkening. SPb: Publishing House «GERDA», 2006. 40 p.
6. Sanev V.I., Kamenev B.B., Sergeyevichev A.V. Cutting of wood and wood materials. SpB.: «Rau», 2018. 384 p.
7. Kamenev B.B., Sergeyevich A.V. Wood cutting tool. SPB.: Published by St. Petersburg. State Forestry Engineering. Ltd. of Ukraine, 2013. 330 p.
8. Ostrovsky V.I. Theoretical foundations of the grinding process. L.: Publishing House of Leningrad University, 1984. 142 p.
9. Overcutting A.B., Kamkin I.P. Definition of the mode of wear of the tool during grinding // Izvestia Volgograd State University. 2015. № 3. P. 24-29.
10. Khakov B.N., Zubkov D.V., Motherland A. Study of grinding performance with self-hardening grain // Bulletin of the Tambov State Technical University. 2012. Vol. 18, № 4. P. 1031-1037.

11. Brinksmeier E. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2006. Vol. 55, ch. 2. P. 667-696. DOI:10.1016/j.cirp.2006.10.00312.
12. Cai G., Feng B., Jin T., Gong Y. Study on the friction coefficient in grinding // Journ. of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 129. P. 25-29.
13. Carrano A.L., Taylor J.B. Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. // Journ. of Manufacturing Processes. 2005. Vol. 7, ch. 1. P. 17-27.
14. Ostrovsky V.I., Savitskaya V.G. Kinematic analysis of the grinding process. M.: Publishing House of Leningrad University, 1987. 153 p.
15. Sergeyevich A.V. Analysis of the destruction of abrasive grains during grinding of wood and wood materials // Forest journal. 2015. № 5. p. 117-125.
16. Filionov L.N. High-speed grinding. L.: Machine building, 1982. 248 p.
17. Silyn S., Leonov B. Optimization of deep grinding technology. M.: Publishing House, 1992. 120 p.
18. Bratan S. Identification of the parameters of removal in combined grinding // Materials international scientific conference Donbas. State. technical. university «Modern technologies and systems of mechanical treatment of wood». Donetsk: Publishing house Donbass. technical. university, 2000. P. 24-32.
19. Novoselov Yu.I. Dynamics of formformation of surfaces in abrasive processing. Sevastopol: Sevastopol. State. University, 2012. 304 p.
20. Chromchak I. Abrasive processing of slab materials on mineral binders. Lvov: Publishing house of Lvov Forest Technical University, 1996. 47 p.