

ДИНАМИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ НОЖЕЙ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ФРЕЗЕРНО- БРУСУЮЩЕЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

¹И.К. Клепацкий, ¹В.В. Раповец, ²А.В. Алифанов, ²А.Н. Матяс, ²А.М. Милюкова

¹Белорусский государственный технологический университет,

²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь

Проведены исследования эффективности упрочняющей обработки дереворежущих ножей (сталь 6ХС) торцово-конических фрез фрезерно-брусующего станка методами магнитно-импульсного воздействия и ионно-плазменного азотирования в сравнении с обычной термической обработкой.

Упрочненные различными методами ножи были испытаны в производственных условиях на ОАО «Борисовский ДОК» на фрезерно-брусующем станке V25 в составе линии агрегатной переработки древесины (сосна, ель). В процессе испытаний производились измерения износа режущей кромки ножей путем определения радиуса округления кромки после каждой смены (всего отработали 5 смен). В ходе испытаний наилучшие результаты показали ножи, упрочненные магнитно-импульсным воздействием, причем период технологической стойкости этих ножей превосходил период стойкости импортных ножей на 20 %.

Ключевые слова: нож, износ режущей кромки, период стойкости, агрегатная обработка, эксперимент, производство, термическая обработка, магнитно-импульсная обработка, ионно-вакуумное азотирование

DYNAMICS OF TECHNOLOGICAL RESISTANCE OF KNIVES OF A MILLING AND CHAINING MACHINE WITH A MODIFIED SURFACE IN THE CONDITIONS OF PRODUCTION

¹I.K. Klepatski, ¹V.V. Rapovets, ²A.V. Alifanov, ²A.N. Matsias, ²A.M. Miliukova

¹Belarusian State Technological University,

²State Scientific Institution «The Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus»,
Minsk, Republic of Belarus

This article presents the results of industrial testing of modified wood-cutting knives of face-conical mills of a milling and chipper machine and their analysis is carried out.

Based on the results of industrial testing, methods for hardening knives were established, which made it possible to achieve technological resistance equal and superior to that of imported knives (the period of technological resistance was increased to 20 % compared to the knives operated at the enterprise).

Keywords: knife, cutting edge wear, durability period, aggregate processing, experiment, production, heat treatment, magnetic pulse treatment, ion-vacuum nitriding

E-mail: igorklepatski@gmail.com

Введение

Недостаточная износостойкость режущего лезвия ножей приводит к необходимости их частой заточки. При эксплуатации обычно стремятся не доводить режущий инструмент до износа, превышающего установленные значения, которые принимают за критерий износа, и постоянно следят за состоянием режущей части инструмента, своевременно его затачивая. В то же время наибольший износ ножей происходит в результате частой заточки, что приводит к уменьшению их стойкости и долговечности [1, 2]. Таким образом, проблема повышения качества режущего инструмента для деревообрабатывающей промышленности является весьма актуальной.

Объектами исследования в данной работе являлись процессы упрочняющей обработки поверхностных слоев стального лезвийного инструмента методами магнитно-импульсного воздействия и ионно-плазменного азотирования в сравнении с обычной термообработкой.

Цель работы — исследование динамики износа режущей кромки инструмента вплоть до потери качественной режущей способности при агрегатной переработке древесины.

Предварительно проведенные исследования показали, что износ происходит неравномерно вдоль режущего лезвия и на нем возникают зоны активного износа. Следовательно, целесообразно подвергать упрочняющей обработке именно эти зоны с целью экономии материальных и энергетических ресурсов, повышения производительности процессов упрочнения.

Износостойкость режущего инструмента зависит от большого числа факторов. Основные факторы: материал инструмента, форма режущих кромок, режим резания, состояние кристаллической структуры материала и наличие остаточных напряжений, вызванных механической и термической обработками. На характер износа режущих кромок лезвия ножа также влияет множество факторов, к которым можно отнести следующие: материал, который подвергается резанию; параметры инструмента и исходное состояние режущих кромок; режим резания; физико-механические свойства материала режущего инструмента.

Материал, оборудование и методики исследований

В промышленных условиях проведены экспериментальные исследования динамики технологической стойкости лезвий дереворежущих ножей из легированной стали 6ХС, установленных взамен ножей базового комплекта из стали 40Х10С2М зарубежного производства (производитель – Faba, Польша), эксплуатируемых на фрезерно-брусующем станке V25, входящего в состав линии агрегатной переработки древесины LINK, предприятия ОАО «Борисовский ДОК». Комплект опытных ножей торцово-конических фрез из стали 6ХС изготовлен по конструкции аналогичной импортной (Польша). Выбор стали марки 6ХС сделан на основании ранее проведенных исследований [3–5].

За время проведения опытно-промышленных испытаний на участок переработки поступала древесина с большим диапазоном влажности (20–45 %) и наличием абра-

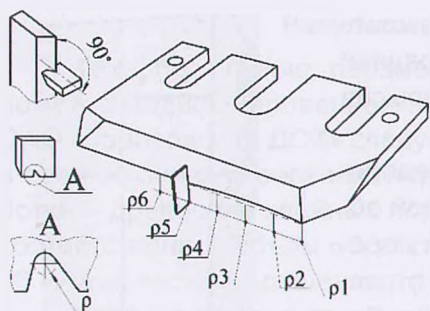


Рис. 1. Метод слепков

живных элементов, что негативно сказывалось на работоспособности дереворежущего инструмента по сравнению с обработкой чистой и более однородной по влажности свежесрубленной древесины.

Износ и затупление инструмента может характеризоваться различными параметрами, одним из которых является радиус округления режущей кромки [6]. Для исследования периода стойкости партии ножей торцово-конических фрез из стали 6ХС были проведены исследования по определению радиуса округления режущих кромок ножей,

которые отработали при одинаковых технологических условиях на ОАО «Борисовский ДОК», методом слепков [7].

Методом слепков [7–9] определялся радиус округления r режущей кромки ножа. На рис. 1 представлена схема осуществления метода слепков: в свинцовых пластинах путем надавливания ножа получали отпечатки (слепки), в разных точках режущей кромки, которые затем через электронные снимки и графическую программу измеряли и вычисляли реальный радиус округления режущей кромки r .

В настоящее время разработано достаточно много способов поверхностного упрочнения сталей с целью повышения ресурса работы инструмента путем улучшения функциональных свойств поверхностного слоя. К таким способам относятся: закалка, механическое упрочнение, химико-термическая обработка, нанесение износостойких покрытий, а также такая относительно новая технология как магнитно-импульсная обработка. Комплект опытных ножей подвергли различным методам поверхностной модификации, позволяющим повысить их технологическую стойкость: все ножи – термической обработке (ТО), часть комплекта – ТО и магнитно-импульсной обработке (МИО), а также часть комплекта – ТО и низкотемпературному азотированию (НТА).

Методы поверхностной модификации

Комплект ножей торцово-конических фрез из стали 6ХС подвергли ТО – закалке в масле от температуры 750 °С. После ТО твёрдость поверхности ножей составила 56 HRC.

Часть комплекта опытных ножей после ТО обрабатывалась методом МИО, суть которого состоит в том, что обработку готовых стальных изделий проводят воздействием импульсами электромагнитного поля определенной напряженности в специальной магнитно-импульсной установке (МИУ) с использованием индукторной системы и с возможностью управления технологическими режимами импульсной обработки. Применение МИО позволяет уменьшить остаточные и усталостные напряжения в металле. Взаимодействие магнитного поля с инструментом происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность вещества. Поэтому, чем выше концентрация поверхностных и внутренних напряжений в материале инструмента, тем больше вероятность локальной концентрации в них микровихрей магнитного внешнего поля.

При изготовлении инструмента в материале неравномерно концентрируется некоторое количество избыточной энергии, с увеличением которой возрастает вероятность его разрушения. За счет уменьшения избыточной энергии материала внешними физико-техническими способами можно повысить надежность работы режущего инстру-

мента. Применение МИО позволяет значительно уменьшить избыточную энергию материала, связанную с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений, тем самым повысить прочность и износостойкость инструмента [10–13].

Эксперименты и испытания на производстве предприятий показывают, что в результате магнитно-импульсной обработки разнообразные инструменты, применяемые в деревообрабатывающей, машиностроительной, пищевой отраслях промышленности, как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом повышают свои эксплуатационные показатели до двух раз [14].

МИО ножей из стали 6ХС проводили в Физико-техническом институте НАН Беларуси на их магнитно-импульсной низкочастотной установке МИУ-3 (рис. 2).

Еще одна часть из комплекта ножей была обработана методом азотирования.

Плазменные процессы могут проводиться при низких температурах благодаря участвующим в них ионам [15]. При азотировании с помощью тлеющего разряда в плазме при температурах 320 °С и 275 °С большая часть энергии, передаваемой катоду, представляет собой энергию (100–500 эВ), получаемую ионами N_2^+ в области падения потенциала катода. Систематические исследования процесса азотирования, осуществляемого с помощью имплантации низкоэнергетических ионов, по сравнению с процессом азотирования с помощью триодного тлеющего разряда показали, что ионы, бомбардирующие поверхность металла во время азотирования с помощью плазмы, благоприятно влияют на процесс, поскольку в результате их неглубокой имплантации они усиливают диффузионные явления. Азотирование железа при помощи тлеющего разряда протекает по диаграмме Лерера и по результатам моделирования ионной имплантации полихроматического пучка ионов N_2^+ с энергией до 100 эВ доказано, что основной механизм азотирования, работающий при низкотемпературной плазме, это – неравновесное увеличение движущей силы диффузии ($\Delta\xi$), связанное с повышенной концентрацией азота на поверхности металла вследствие имплантации ионов.

Значительное снижение температуры азотирования позволяет применять плазменное азотирование для всех марок стали независимо от температуры их отпуска. С другой стороны, низкая температура процесса не способствует образованию глубоких (толстых) азотированных слоев. Поэтому низкотемпературное азотирование представляется наиболее подходящим для улучшения механических свойств режущих инструментов, особенно ножей из низколегированной стали.

Основываясь на гипотезе, что имплантация ионов играет преимущественную роль в плазменных процессах, проводимых при низких температурах, разработан метод низкотемпературного азотирования (НТА) [15] металлов с участием ионов, присутствующих в диодной плазме тлеющего разряда. Метод НТА позволяет точно контролировать распределение твердости в направлении, перпендикулярном поверхности, подвергаемой азотированию, что особенно важно в случае относительно тонких диффузионных слоев, которые создаются на режущих металлострументках, чтобы улучшить их износостойкость. Благодаря низкой температуре процесса металлострументки НТА можно использовать для обработки стали независимо от температуры отпуска. Эти свойства метода НТА позволили применять его для производства экологически чистых и дешевых ножей для деревообрабатывающей промышленности.

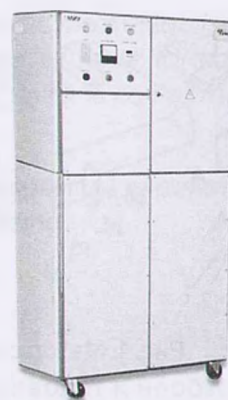


Рис. 2. Установка МИУ-3

Результаты исследования и их обсуждение

Технологические параметры промышленных испытаний комплекта опытных ножей с модифицированной поверхностью, проведенных в условиях производства ОАО «Борисовский ДОК» следующие: фрезерно-брусующий станок второго ряда V25 в составе линии агрегатной переработки древесины LINK (Германия), материал обработки – древесина хвойных пород [5] (сосна, ель; соотношение состава пород 93/7 % соответственно); объём обработки – 2100 м³; время работы – 40 ч; скорость подачи – 36 м/мин; частота вращения фрез – 800 мин⁻¹.

Часть из комплекта ножей испытывали после термической обработки – закалки в масле от температуры 750 °С (твёрдость поверхности составила 56 HRC). После каждой смены испытаний (одна смена длится 8 ч) универсальным для производственных условий методом слепков проводили измерения радиусов округления режущей кромки опытных образцов ножей.

Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ρ_n опытных образцов ножей за 5 смен (n) работы приведены в табл. 1.

Табл. 1

Результаты измерений радиуса округления режущей кромки (нож с ТО)

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1 , мкм (1 мм от края кромки)	38	63	79	98	133
ρ_2 , мкм (15 мм)	39	65	79	102	139
ρ_3 , мкм (30 мм)	36	61	74	95	124
ρ_4 , мкм (45 мм)	28	49	60	66	83
ρ_5 , мкм (60 мм)	17	29	36	43	58
ρ_6 , мкм (72 мм)	8	9	16	23	33

Модифицирование поверхности ножей после ТО с применением технологии магнитно-импульсного упрочнения проводилась на плоском индукторе двумя импульсами длительностью 36 мкс с энергией воздействия 8 кДж. Выбор режима воздействия сделан на основании ранее проведенных исследований. Твёрдость поверхности образца после МИО составила 57 HRC. Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ρ_n образцов ножей после проведения испытаний приведены в табл. 2.

Табл. 2

Результаты измерений радиуса округления режущей кромки (нож с ТО + МИО)

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1 , мкм (1 мм от края кромки)	38	65	81	94	117
ρ_2 , мкм (15 мм)	37	66	79	95	122
ρ_3 , мкм (30 мм)	35	61	71	88	105
ρ_4 , мкм (45 мм)	26	46	56	61	69
ρ_5 , мкм (60 мм)	16	27	33	40	49
ρ_6 , мкм (72 мм)	9	10	15	22	29

В данной работе поверхность части комплекта ножей модифицировали в камере вакуумно-плазменной установки [16], в среде N-H-Ar при температуре 390 °С и времени выдержки 12 ч. Твёрдость поверхности после проведённой модификации НТА составила 50 HRC.

Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ρ_n образцов ножей после проведения испытаний приведены в табл. 3.

Табл. 3

Результаты измерений радиуса округления режущей кромки (нож с ТО + НТА)

Радиус округления после n (8ч) смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1 , мкм (1 мм от края кромки)	121	–	–	–	–
ρ_2 , мкм (15 мм)	163	–	–	–	–
ρ_3 , мкм (30 мм)	152	–	–	–	–
ρ_4 , мкм (45 мм)	138	–	–	–	–
ρ_5 , мкм (60 мм)	93	–	–	–	–
ρ_6 , мкм (72 мм)	69	–	–	–	–

Аварийный износ кромки (рис. 3, график ТО + НТА), который произошел после 4-х часов работы, может говорить о том, что данная технология модификации поверхности инструмента не подошла для стали 6ХС и о необходимости дальнейшего изучения процессов упрочнения методом ионно-вакуумного азотирования.

На рис. 3 показаны кривые измерения радиуса округления режущей кромки ножа в зависимости от метода обработки.

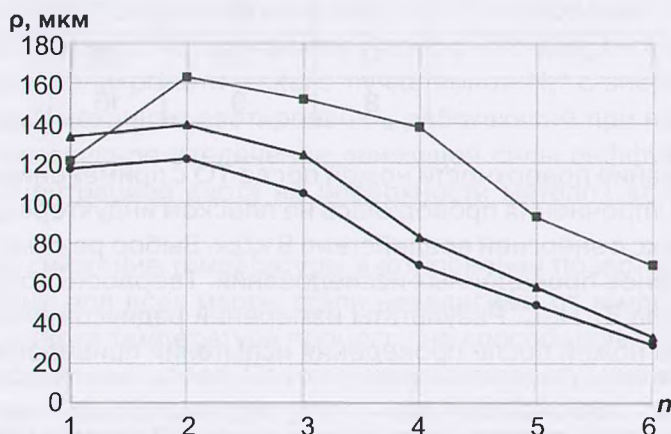


Рис. 3. Сравнительный график изменения радиуса округления ρ режущей кромки ножей по его длине (точках n на кромке лезвия) в зависимости от метода обработки:
▲ – ТО, 400 ч.; ● – ТО, 400 ч. + МИО; ■ – ТО+НТА, 4 ч.

Из рис. 3 видно, что график изменения радиуса округления ρ режущей кромки ножей, обработанных по технологии ТО + МИО, по его длине имеет самые малые значения, что говорит о его остроте и высокой технологической стойкости после испытаний на производстве.

Заключение

По результатам экспериментальных исследований на производстве ОАО «Борисовский ДОК», были получены следующие результаты:

1. Самый высокий показатель технологической стойкости – у ножей, обработанных по технологии ТО + МИО – $\rho_{\max} = 122$ мкм после 40 ч работы (2100 м^3) (табл. 2).

2. Комплект ножей, обработанных по технологии ТО + НТА, не подтвердил свою эффективность, обработав всего 250 м^3 круглых лесоматериалов древесины сосны в течение 4 часов, при этом полностью потеряв режущую способность. При этом максимальный радиус округления режущей кромки ρ_{\max} составил 163 мкм (табл. 3). Невысокий период стойкости режущей кромки может говорить о неподходящей технологии упрочнения и необходимости дальнейшего изучения данного процесса обработки.

3. Лучшую технологическую стойкость, по сравнению с комплектом ножей, упрочнённых ТО + НТА, показали ножи, упрочнённые методом ТО, обработав 2100 м^3 , и при этом максимальный радиус округления $\rho_{\max} = 139$ мкм (усреднённый показатель технологической стойкости импортных ножей, используемых на предприятии – $\rho_{\max} = 178$ мкм) (табл. 1).

Поверхностное упрочнение ножей с использованием технологии магнитно-импульсной обработки позволило получить технологическую стойкость, превосходящую стойкость ножей импортного производства на 20 %. Из этого можно сделать вывод, что такие ножи соответствуют эксплуатационным требованиям и могут быть рекомендованы для использования на отечественных деревообрабатывающих предприятиях, использующих агрегатную технологию переработки древесины хвойных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башков, В.М. Испытание режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П. Г. Кацев. – Москва : Машиностроение, 1985. – 136 с.
2. Гринь, С.А. Улучшение эксплуатационных характеристик куттеров путем создания новой конструкции ножей / С.А. Гринь, О.М. Филенко, А.А. Телюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2012. – № 66 (972). – С. 14–19.
3. Раповец, В.В. Конструкция и расчеты фрезерно-брусующих станков / В.В. Раповец, С.А. Гриневиц, Н.В. Бурносов. – Минск : БГТУ, 2015. – 82 с.
4. Раповец, В.В. Комплексная обработка древесины фрезами со спиральным расположением сборных двухлезвийных ножей, обеспечивающая качество продукции и снижение энергозатрат: дис. канд. техн. наук. – Минск, 2011. – 206 с.
5. Клепацкий, И.К. Эффективные методы повышения технологической стойкости ножей для агрегатной переработки древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, 2018. № 1 (204). Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – С. 190–195.
6. Раповец, В.В. Критерий временной стойкости двухлезвийных резцов фрезерно-брусующих станков в зависимости от требуемого качества продукции / Раповец В.В., Бурносов Н.В. // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды II Междунар. Евраз. симпоз., Екатеринбург, 2–5 окт. 2007 г. / Урал. гос. лесотехн. ун-т; под ред. В.Г. Новоселова. Екатеринбург, 2007. – С. 222–225.
7. Клепацкий, И.К. Динамика потери режущей способности лезвий малоножевых фрез при агрегатной переработке древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (216). – С. 190–195.
8. Глебов, И.Т. Оборудование отрасли: исследование микрогеометрии режущих кромок лезвий / И.Т. Глебов, А.Р. Абдулов. – М.: Екатеринбург : УГЛТУ, 2013. – 9 с.
9. Партон, В.З. Механика разрушения / В.З. Партон. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
10. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази. – Л.: Машиностроение, 1977. – 229 с.
11. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975. – 278 с.
12. Алифанов, А.В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А.В. Алифанов, Д.А. Ционенко, А.М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В.В. Клубовича – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – Гл.2. С. 31–52.
13. Алифанов, А.В. Технология изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.А. Томило. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 321 с.
14. Прогрессивные технологии упрочнения магнитно-импульсным воздействием металлических изделий для различных отраслей промышленности / А.М. Милюкова [и др.] // Сборник докл. симпозиума «Технологии. Оборудование. Качество» 2 семинара в рамках Белорусского промышленного форума 2018 (Минск,

29 мая –1 июня 2018 г.) / В.С. Харитончик [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2018. – С. 164–168.

15. Kurzydłowski Glow discharge assisted low-temperature nitriding of knives used in wood processing. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering / Sokołowska A. [et al.]. Vol. 37, issue 2, 2009. – P. 690–693.

16. Петренко, М.Н. Повышение стойкости дереворежущего инструмента технологическими методами: автореф. дис. канд. техн. наук. Химки, 1984. – 18 с.

REFERENCES

1. Bashkov V.M., Kacev P.G. Ispytanie rezhushchego instrumenta na stojkost' [Testing the cutting tool for resistance] / Moscow, Mashinostroenie, 1985, 136 p. (in Russian)
2. Grin S.A., Filenko O.M., Telyuk A.A. Uluchshenie ekspluatatsionnykh harakteristik kutterov putem sozdaniya novoy konstrukcii nozhej [Improving the operational characteristics of cutters by creating a new design of knives] // Visnik NTU «HPI». Seriya : Novi rishennya v suchasniykh tekhnologiyah. – H: NTU «HPI», – 2012. – № 66 (972), pp. 14–19. (in Russian)
3. Ding F. [et al.] Wood chip physical quality definition and measurement / Pulp & Paper Canada, 106:2, 2005, pp. 27–32.
4. Borovikov E.M., Fefilov L.A., Shestakov V.V. Lesopileniye na agregatnom oborudovanii . Moscow. : Lesnay promyshlennost, 1985, 216 p. (in Russian)
5. Zotov G.A., Pamfilov E.A. Povysheniye stojkosti derevorezhushchego instrumenta. Moscow. : Ekologiya Publ. –1991, 384 p. (in Russian)
6. Petrenko, M.N. Povysheniye stojkosti derevorezhushchego instrumenta tekhnologicheskimi metodami : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Khimki. Publ, 18 p. (in Russian)
7. Rapovec V.V., Grinevich S.A., Burnosov N.V. Konstrukciya i raschety frezerno-brusuyushchih stankov. – Minsk : BGTU, 2015, 82 p. (in Russian)
8. Sokołowska A. [et al.] Kurzydłowski Glow discharge assisted low-temperature nitriding of knives used in wood processing. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering / Vol. 37, issue 2, 2009, pp. 690–693.
9. Taratin V.V., Fefilov L.A., Borichev E.A. Sovershenstvovanie malonozhevyyh torcovo-konicheskikh frez agregatnogo lesopilnogo oborudovaniya // Mezhdvuzovyy sbornik nauchnykh trudov SPbLTA. Stanki i instrumenty derevoobrabatyvayushchih proizvodstv. SPb., 1993, pp. 93–97. (in Russian)
10. Rapovec, V.V. Kompleksnaya obrabotka drevesiny frezami so spiralnym raspolozheniem sbornyyh dvuhlezhvinykh nozhej, obespechivayushchaya kachestvo produktsii i snizhenie energozatrat: dis. kand. tekhn. nauk. – Minsk, 2011, 206 p. (in Russian)
11. Klepackiy, I.K. Effektivnyye metody povysheniya tekhnologicheskoy stojkosti nozhej dlya agregatnoy pererabotki drevesiny // Trudy BGTU. Ser. 1, 2018. № 1 (204). Lesnoe hozyajstvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov, pp. 190–195. (in Russian)
12. Rapovec V.V., Burnosov N.V. Kriteriy vremennoy stojkosti dvuhlezhvinykh rezcov frezernobrusuyushchih stankov v zavisimosti ot trebuemogo kachestva produktsii // Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovanie, menedzhment XXI veka: tru-dy II Mezhdunar. Evraz. simpoz., Ekaterinburg, 2–5 okt. 2007 g. / Ural. gos. lesotekhn. un-t; pod red. V.G. Novoselova. Ekaterinburg, 2007, pp. 222–225. (in Russian)
13. Klepackiy, I.K. Dinamika poteri rezhushchej sposobnosti lezviy malonozhevyyh frez pri agregatnoy pererabotke drevesiny // Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe hozyajstvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov. 2019. № 2 (216), pp. 190–195. (in Russian)
14. Glebov I.T., Abdulov A.R. Oborudovanie otrasli: issledovanie mikrogeometrii rezhushchih kromok lezviy / Moscow, Ekaterinburg : UGLTU, 2013. 9 p. (in Russian)
15. Parton, V.Z. Mekhanika razrusheniya / Moscow, Nauka, 1990, 240 p. (in Russian)
16. Askinazi, B.M. Uprochnenie i vosstanovlenie detaley elektromekhanicheskoy obrabotki / – L.: Mashinostroenie, 1977, 229 p. (in Russian)
17. Stepanov V.G., Shavrov I.A. Vysokoenergeticheskie impulsnyye metody obrabotki metallov / L. : Mashinostroenie, 1975, 278 p. (in Russian)
18. Alifanov A.V., Cionenko D.A., Milyukova A.M. Fizika processa magnitno-impulsnogo uprochneniya stalnykh izdelij, raschet induktorov i parametrov processa // Perspektivnyye materialy i tekhnologii / pod obshch. red. V.V. Klubovicha – Vitebsk : UO «VGTU», 2017. – Gl.2, pp. 31–52. (in Russian)
19. Alifanov A.V., Milyukova A.M., Tomilo V.A. Tekhnologiya izgotovleniya i uprochneniya vysokonagruzhennykh detalej mashinostroeni. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2014, 321 p. (in Russian)
20. A. M. Milyukova [ets] Progressivnyye tekhnologii uprochneniya magnitno-impulsnym vozdejstviem metallicheskikh izdelij dlya razlichnykh otraslej promyshlennosti // sbornik dokl. simpoziuma «Tekhnologii. Oborudovanie. Kachestvo» 2 seminar v ramkah Belorusskogo promyshlennogo foruma 2018 (Minsk, 29 maya –1 iyunya 2018 g.) / V.S. Haritonchik [i dr.]. – Minsk: Biznesofset, 2018, pp. 164–168. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 14.07.2020