

УДК 655.3

© М. И. Кулак, д.ф.-м.н., профессор, Д. М. Медяк, к.т.н.,
доцент, УО «Белорусский государственный технологический
университет», Минск, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ НОЖЕЙ БУМАГОРЕЗАЛЬНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проанализировано развитие теории резания бумаги и методов измерения ширины режущей кромки лезвия в процессе износа ножа. Представлено приспособление к микрометру для измерения ширины лезвийного инструмента и способ определения радиуса закругления режущей кромки такого инструмента. Построена карта износа ножа и исследован процесс износа самозатачивающегося ножа.

Ключевые слова: резание бумаги; режущая кромка лезвия; износ ножа; микрометр; карта износа; самозатачивающийся нож.

Постановка проблемы

В настоящее время отсутствует комплексный теоретический подход, обеспечивающий эффективное функционирование бумагорезального оборудования на всех стадиях его жизненного цикла. Проблема заключается в том, что методы технического диагностирования и прогнозирования ресурса режущего инструмента в процессе его эксплуатации, а также теоретические исследования процессов изнашивания бумагорезальных ножей не развиты в необходимой мере.

Цель работы

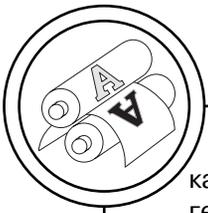
Предлагаемое исследование посвящено вопросам совершенствования методики прогнозирования параметров, характери-

зующих износостойкость режущего инструмента в процессе эксплуатации.

Анализ предыдущих исследований

Начало изучения закономерностей резания стоп бумаги приходится на первую половину двадцатого века. Пионерами этих исследований были В. Т. Бушунов, В. С. Цацкин, Б. М. Мордовин, В. З. Гинзбург.

В процессе исследований были рассмотрены физические явления, сопровождающие процесс резания, определены факторы, влияющие на усилия резания, построены аналитические зависимости для расчета этих усилий. Экспериментально было исследовано влияние на усилие и точность резания таких факторов



как: вид бумаги; высота стопы; геометрические параметры ножа; угол установки ножа; траектория и скорость его движения. Более подробные обзоры первоначальных исследований приведены в литературе [1–3]. Результаты этих экспериментальных и теоретических исследований послужили научной базой для конструирования резальных машин в последующие периоды двадцатого века [1, 2].

Современный этап исследований связан с поиском и разработкой нетрадиционных способов резания для создания новой технологии резки бумаги и резального оборудования [4–6].

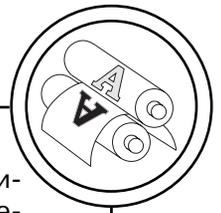
Износ современного высокопроизводительного режущего инструмента представляет собой сложный физико-химический комплекс, включающий в различных сочетаниях следующие процессы [1, 7]: абразивный износ; механическое диспергирование; тепловой износ; окислительный износ; электрохимическая коррозия; электрическая эрозия.

При низких скоростях резания, характерных для одно- и трехножевых бумагорезальных машин, преобладают абразивный износ и механическое диспергирование. При высокоскоростной обработке проявляется тепловой износ и электрическая эрозия. Окислительный износ может иметь место, когда обрезка сочетается с наличием влаги.

Параллельно с развитием теории резания бумаги развивались способы исследования процесса затупления бумагорезальных ножей и другого лезвийного инструмента.

Одним из первых был разработан оптический способ измерения ширины режущей кромки лезвия и расчета радиуса его закругления [8]. Сущность способа заключается в том, что с помощью внешней подсветки лезвия добиваются наиболее четкого перехода от тени к свету в местах сопряжения его передней и задней граней с режущей кромкой. При рассмотрении в микроскоп режущая кромка наблюдается в виде темной полоски. Ширина режущей кромки лезвия измеряется с помощью окулярного микрометра микроскопа типа МИМ. Точность измерения ширины кромки лезвия зависит от установки лезвия на столике микроскопа, освещения и выбора увеличения. Недостатками этого способа являются субъективность при измерении ширины кромки, длительность получения результата, сложность измерений непосредственно на рабочем месте, а также при малых радиусах закругления.

Повысить оперативность измерений позволяет способ с использованием электрического поля [9]. При его реализации перед электродом устанавливают резец с зазором 4–5 мм, на него подают напряжение порядка 3–4 кВ, далее напряжение постепенно повышают до появления коронного разряда, измеряют напряжение зажигания разряда. Радиус закругления режущей кромки определяют по тарировочному графику, представляющему напряжение зажигания коронного разряда, как эмпирическую функцию от



радиуса, либо по специально проградуированной шкале вольтметра.

Недостатки данного способа проистекают из того, что это косвенный способ измерения. Для построения тарировочного графика необходимо предварительно прямым измерением определить радиус закругления режущей кромки при различных значениях напряжения зажигания коронного разряда. Напряжение электрического пробоя воздуха существенно зависит от его влажности. Поэтому, если этот параметр может быть стабильным в лабораторных условиях, при проведении исследований с целью построения тарировочного графика, то в производственных условиях влажность воздуха может существенно меняться даже на протяжении рабочей смены.

В процессе износа инструмента происходит образование вторичных структур в материале на поверхности режущей кромки [1, 7]. В результате его свойства, в том числе электропроводность, начинают динамически меняться в зависимости от степени износа кромки. Все эти факторы понижают стабильность и надежность измерений в рамках способа [9].

Известен способ определения радиуса закругления с помощью слепков с режущей кромки лезвия [8]. Способ позволяет определять радиус закругления режущих кромок у лезвий ножей, зубьев пил, сверл, резцов, фрез и других режущих инструментов. Сущность способа заключается в том, что исследуемое лезвие вдавливается в блок

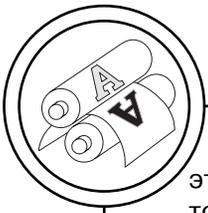
из трех свинцовых или алюминиевых пластинок. Для повышения точности измерения пластинки должны быть тонкими (1,5–2,0 мм), измерение выполняется по средней пластинке. Определение радиуса на слепках осуществляется несколькими способами: замериванием по слепку на микроскопах типа МИМ-5, БМИ; фотографированием слепка с увеличением на микроскопе; фотографированием цифровой фотокамерой встроенной в микроскоп типа POLAR и определением радиуса в графическом пакете PhotoShop или CorelDraw на ЭВМ. Недостаток способа слепков заключается в его трудоемкости, поэтому он находит применение преимущественно в лабораторных условиях.

Способ определения радиуса закругления с помощью слепков получил развитие в [10]. Отличие состоит в том, что с целью упрощения измерений на слепке измеряют глубину вдавливания L и ширину отпечатка a . Радиус закругления ρ (или затупления — по терминологии принятой в [10]) рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{a - L \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \beta + \frac{1}{\cos \beta}}, \quad (1)$$

где β — угол заточки лезвия.

Данная формула позволяет найти радиус ρ , если поверхность пластинки для получения слепка и задняя грань лезвия при вдавливании строго перпендикулярны. Однако на практике



это трудновыполнимо. За счет того, что задняя грань лезвия внедряется в пластинку перпендикулярно, а передняя грань под углом β , силы сопротивления, действующие на эти грани, не уравновешены. В результате возникает крутящий момент стремящийся развернуть лезвие против часовой стрелки и уравновесить силы, действующие на обе грани. Таким образом, в слепок вносится искажение, он не является точной геометрической копией лезвия, а отражает траектории движения точек лезвия при его внедрении в пластинку. Кроме этого, материалы, из которых изготавливаются пластинки, в определенной степени обладают упругими свойствами. Поэтому после удаления лезвия из пластинки упругая составляющая деформации также будет вносить искажения в отпечаток.

В целом способы, связанные с получением слепков, при кажущейся простоте и доступности методики снятия самих слепков, не дают возможности получить достаточную точность, как и большинство косвенных способов измерений. Они пригодны для приблизительной оценки состояния лезвия. В этом отношении способы, основанные на прямых измерениях лезвия, имеют преимущество.

Разработан способ прямого измерения радиусов притупления кромок деталей [11]. Устройство для реализации способа содержит базовую призму с перпендикулярно расположенными сторонами и отсчетный узел, измерительный шток которого направлен по

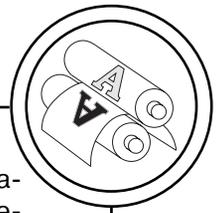
биссектрисе базовой призмы. Перед началом обмеривания измерительный шток настраивают на начало отсчета по линии пересечения сторон базовой призмы, при этом шток ориентируют по биссектрисе призмы. Далее в измерительную призму устанавливают деталь с притупленной кромкой, регистрируют величину L перемещения измерительного штока до контакта с кромкой и вычисляют радиус закругления кромки по формуле:

$$\rho = \frac{L}{\frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} - 1}, \quad (2)$$

где β — угол между сторонами призмы.

В описании изобретения [11] указывается, что базовая призма имеет перпендикулярно расположенные стороны, т. е. $\beta = 90^\circ$. Однако в формуле изобретения угол β не конкретизируется. Формула для расчета радиуса закругления кромки ρ справедлива для любых углов $\beta \leq 90^\circ$. Способ [11] теоретически применим для прямых измерений радиусов закругления режущих кромок лезвий.

Недостатком этого способа является низкая точность при измерении кромок с малым радиусом закругления. Для обеспечения точности измерения базовая призма должна касаться контролируемого лезвия обеими гранями, причем измерительный шток должен перемещаться строго по биссектрисе



угла заточки лезвия. Ввиду подвижности призмы обеспечить выполнение этих условий технически достаточно сложно. Сложность измерений многократно возрастает при контроле лезвий расположенных в труднодоступных местах, когда режущий инструмент установлен в обрабатываемом станке. Если на производстве используется лезвийный инструмент с разными углами заточки или фасками, то необходимо иметь комплект измерительных устройств или базовых призм для каждого значения угла заточки.

Результаты проведенных исследований

Исследования проводились на бумагорезальной машине IDEAL 7228-95 LT, оснащенной стальным ножом серии 7228/721 HSS. Технические характеристики бумагорезальной машины следующие: длина реза — 720 мм; максимальная высота стопы листов — 80 мм; рабочая глубина стола — 720 мм; длина ножа — 940 мм.

В качестве обрабатываемого материала использовалась мелованная матовая чистоцеллюлозная бумага Hansol Paper. Основные характеристики бумаги: формат — 650×940 мм; плотность — 128 г/м²; толщина — 115 мкм; влажность — 5,0 %; белизна — 118 %; непрозрачность — 93 %; жесткость — 195/125 мН.

В процессе исследований измерялась ширина режущей кромки лезвия ножа b через каждые 100 резов стопы бумаги высотой $h = 11,5$ мм. Всего было выполнено 500 резов.

Измерения проводились с шагом 135 мм в точках лезвия лежащих напротив точек крепления ножа в машине. Поскольку длина ножа 940 мм, длина реза 720 мм, а ширина бумаги 650 мм, то три первые точки ножа слева не входили в контакт с бумагой и измерения в них не выполнялись.

Для измерений использовался микрометр со специальным приспособлением [12]. Радиус закругления режущей кромки лезвия ножа ρ определялся по формуле

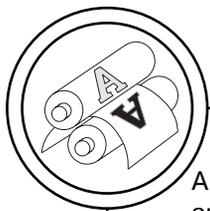
$$\rho = \frac{B - (h + r \sin \beta) \operatorname{tg} \beta}{1 + \cos \beta - (1 - \sin \beta) \operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

где B — ширина лезвийного инструмента по индикатору микрометра; h — база измерения, мкм; r — радиус закругления острия конической измерительной губки микрометра, мкм. Более подробно методика измерений описана в [13].

Эспериментальные данные были использованы для построения теоретического описания процесса износа ножа с помощью кинетического уравнения предложенного в [14] для исследования тиражестойкости печатных форм. Применительно к данному исследованию решение кинетического уравнения — функция износа — выглядит следующим образом

$$W(N) = \frac{1}{A_k} \ln \left[\frac{(A - N_0)N}{N_0(A - N)} \right], \quad (4)$$

где W — характеристика износа; N — количества циклов резания;



A — асимптота, предельное значение количества циклов резания, после проведения которого, режущая кромка неприемлемо затупляется в результате износа; k — константа скорости изменения характеристики износа; N_0 — начальное количество циклов резания, после которого изменение ширины режущей кромки начинает фиксироваться микрометром. Значения параметров A , k , N_0 определяются по экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов.

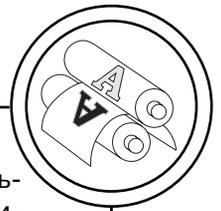
Логическим обоснованием для применения (4) в данном исследовании является тот факт, что в общем процессе износа печатных форм, вне зависимости от того, из какого материала они изготовлены, выделяются три стадии: начальный, установившийся и усиленный износ. Аналогичные стадии

прослеживаются и в процессе износа бумагорезальных ножей [13, 15], а также инструмента для резания других материалов [7, 8].

Безусловно, что определяющим здесь является наблюдаемый механизм износа материала. Вместе с тем, например, абразивный износ, с точки зрения процесса, не может иметь существенных отличий для металлической печатной формы или ножа, если он обусловлен именно контактом с бумагой. Существенным для теоретического описания является то, что на второй стадии, наряду с основным процессом износа, проявляется конкурирующий процесс, который его уравнивает или компенсирует. Этот факт и находит отражение в уравнении функции износа (4). Примечателен также факт, что предложенное кинетическое

Значения параметров функции износа

Относительные координаты измеряемых точек ножа, L, мм	Фаза износа	Значения параметров			Значения критерия Фишера	
		A, циклов	k	N_0	расчетные, F_p	табличные, F_T
Бумагорезальная машина IDEAL 7228-95 LT						
0	Первая	$2,432 \cdot 10^3$	$1,738 \cdot 10^{-4}$	0,700	1,499	6,390
135		$1,959 \cdot 10^3$	$2,833 \cdot 10^{-4}$	0,130	1,131	6,390
270		$1,737 \cdot 10^3$	$2,187 \cdot 10^{-4}$	0,540	1,087	6,390
405		$1,603 \cdot 10^3$	$4,218 \cdot 10^{-4}$	0,002	1,510	6,390
540		$1,951 \cdot 10^3$	$4,168 \cdot 10^{-4}$	0,001	1,535	6,390
Бумагорезальная машина BOWAY BW-670V						
605	Первая	$0,364 \cdot 10^3$	$1,921 \cdot 10^{-4}$	16	1,164	9,280
	Вторая	$0,950 \cdot 10^3$	$0,418 \cdot 10^{-4}$	19	1,226	4,280
	Третья	$2,227 \cdot 10^3$	$0,029 \cdot 10^{-4}$	400	1,014	6,390



уравнение оказалось применимо для описания изменения оптических свойств банкнотной бумаги в процессе искусственного старения [16].

Результаты обработки данных измерений приведены в табл. 1 и на рис. 1.

На рис. 1 приведена карта износа ножа [17]. Данные в табл. и на рис. 1 подтверждают тот факт, что износ ножей бумагорезальных машин существенно зависит от условий их технологической эксплуатации. Если машина используется для обрезки книжных блоков и брошюр, то действительно, как показано в [15], в наибольшей степени изнашиваются крайние области ножа. Проводившийся в данной работе эксперимент моделирует технологические операции разрезки листовой продукции и подрезки стоп бумаги. В этом случае в наибольшей степени изнашивается центральная часть ножа, для точек которой путь резания наибольший. Это объясняется тем, что нож в процессе резания совершает сабельное движение.

Второй этап исследований проводился на бумагорезальной машине BOWAY BW-670V. Технические характеристики машины следующие: длина реза — 670 мм; максимальная высота стопы листов — 80 мм; рабочая глубина стола — 670 мм.

Машина BOWAY BW-670V снабжена самозатачивающимся ножом. На рис. 2 приведена зависимость радиуса закругления режущей кромки лезвия ножа от количества циклов резания. Видно, что до 200 резов ширина режущей кромки возрастает.

Далее она начинает уменьшаться и при 500 резах стабилизируется. Начиная с 600 резов наступает новый этап необратимого возрастания радиуса режущей кромки. Естественно на всех этих этапах происходит износ ножа.

Как приведено в табл., процесс износа ножа машины BOWAY BW-670V распадается на три фазы. Константы скорости износа для каждой фазы существенно различаются. Четко прослеживается зависимость — при уменьшении скорости — асимптота возрастает. На рис. 3 построена функция износа данного ножа. Рис. 3 наглядно демонстрирует фазы износа и показывает, что применение механизма самозатачивания позволяет повысить стойкость ножа до 2000 циклов, как и указано в паспорте машины.

Выводы

Эффективность процесса резания бумаги является основой высокотехнологичных процессов в полиграфии. Результаты проведенного исследования,

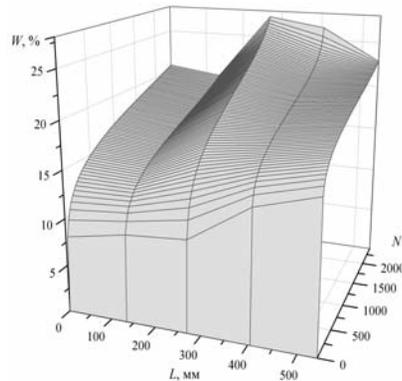


Рис. 1. Карта износа ножа

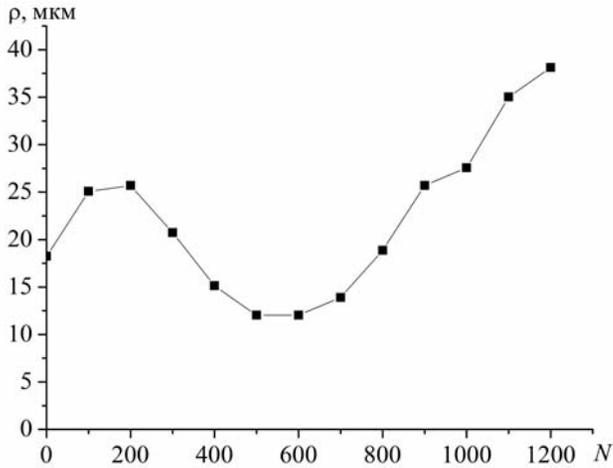
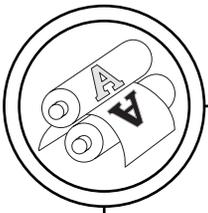


Рис. 2. Зависимость радиуса закругления режущей кромки лезвия от количества циклов резания для самозатачивающегося ножа

опыт эксплуатации бумагорезального оборудования на полиграфических предприятиях свидетельствуют, что имеются существенные резервы для повышения его производительности и надежности в резуль-

тате использования научно обоснованных рекомендаций по оптимизации параметров режущего инструмента, режимов обработки, разработки и внедрения систем оперативного контроля состояния инструмента.

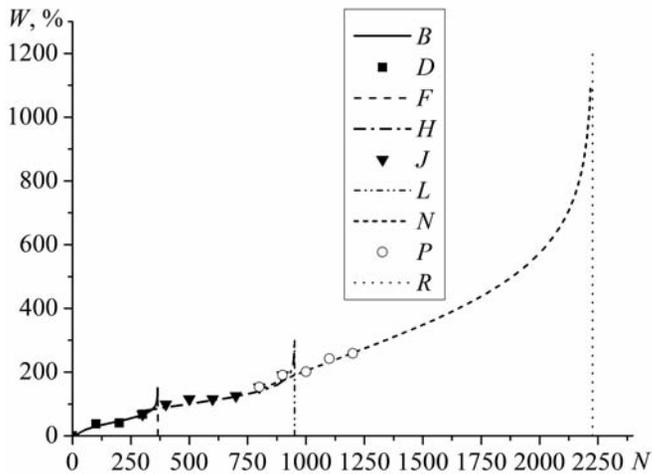
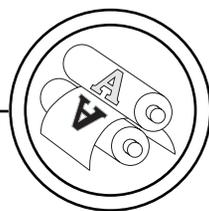
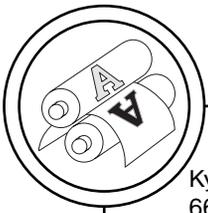


Рис. 3. Функция износа самозатачивающегося ножа: В, Н, N — теоретические расчеты; D, J, P — экспериментальные данные; F, L, R — асимптоты



Список использованной литературы

1. Киселев С. С. Стойкость бумагорезательных ножей / С. С. Киселев. — М. : Лесная пром-сть, 1971. — 105 с.
2. Пергамент Д. А. Брошюровочно-переплетное оборудование / Д. А. Пергамент. — М. : МПИ, 1990. — 452 с.
3. Иващенко В. Т. Исследование и оптимизация синтеза механизмов ножа одноножевых бумагорезальных машин типажного ряда : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.15 / В. Т. Иващенко. — Львов : УПИ, 1979. — 20 с.
4. Токмаков Б. В. Разработка и проектирование механизмов ножей скоростных резальных машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.15 / Б. В. Токмаков. — М. : МГУП, 2000. — 235 с.
5. Топольницький П. В. Наукові основи безвистійного обрізування книжково-журнальних блоків : технологія та устаткування : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.15 / П. В. Топольницький. — Львів : УПІ ім. Ів. Федорова, 2003. — 385 с.
6. Омельченко Л. А. Обработка корешков бумажных блоков торцовыми фрезами : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Л. А. Омельченко. — Тула : ТулГУ, 2009. — 128 с.
7. Грубе А. Э. Дереворежущие инструменты / А. Э. Грубе. — М. : Лесная пром-сть, 1971. — 344 с.
8. Санёв В. И. Основы резания древесины / В. И. Санёв, А. В. Сергеевичев. — СПб. : СПбГЛТА, 2007. — 87 с.
9. А. с. 582914 СССР, МПК2 В 23 В 25/06. Способ оценки остроты режущих инструментов / О. П. Афанасьев, Г. А. Зотов. — № 2337609/2508; Заявл. 22.03.1976; Опубл. 05.12.1977, Бюл. № 45 // Бюллетень Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. — 1977. — № 45. — С. 37.
10. А. с. 1682755 СССР, МПК5 G 01 В 5/20. Способ определения радиуса затупления лезвия режущего инструмента по отпечатку / Н. Н. Агапонов. — № 4669926/28; Заявл. 28.02.1989; Опубл. 07.10.1991, Бюл. № 37 // Бюллетень Открытия. Изобретения. — 1991. — № 37. — С. 158.
11. А. с. 1224545 СССР, МПК2 G 01 В 5/20. Способ измерения радиусов притупления кромок / В. Г. Субботин. — № 3772861/25-28; Заявл. 18.07.1984; Опубл. 15.04.1986, Бюл. № 14 // Бюллетень Открытия. Изобретения. — 1986. — № 14. — С. 152.
12. Кулак М. И. Приспособление для измерения ширины лезвийного инструмента к микрометру и способ определения радиуса закругления режущей кромки лезвийного инструмента : пат. Респ. Беларусь МПК G 01В 5/213 / М. И. Кулак, Д. М. Медяк, И. И. Кулак, Е. В. Барковский; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. — № а 20130727; заявл. 07.06.2013; положительное решение 14.07.2016 / Нац. центр интеллектуал. собственности. — 2016.
13. Кулак М. И. Исследование стойкости ножей бумагорезальных машин в процессе эксплуатации / М. И. Кулак, И. Г. Марченко, Т. А. Долгова // Труды БГТУ. — 2013. — № 9 : Издат. дело и полиграфия. — С. 29–33.
14. Кулак М. И. Прогнозирование тиражестойкости печатных форм / М. И. Кулак, О. В. Сидельник // Труды БГТУ. — 2012. — № 9 : Издат. дело и полиграфия. — С. 18–22.
15. Хведчин Ю. И. Резальные машины и комплексы POLAR / Ю. И. Хведчин, Ю. А. Шостачук, М. Овчар. — Киев : ПКП «СТ-Друк», 2004. — 204 с.
16. Kulak M. I. Kinetic Model of Optical Characteristics of Banknote Paper During Artificial Aging / M. I. Kulak, T. Yu. Kyrychok, D. M. Miadziak, P. O.

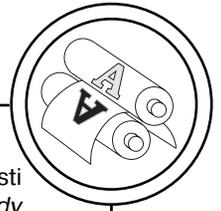


Kurychok // Journal of Applied Spectroscopy. — 2016. — Vol. 83(4). — P. 669–672. — Перевод изд. : Кулак М. И. Модель кинетики оптических свойств банкнотной бумаги в процессе искусственного старения / М. И. Кулак, Т. Ю. Киричек, Д. М. Медяк, П. А. Киричек // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, № 4. — С. 660–663.

17. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М. : Физматлит, 2007. — 368 с.

References

1. Kiselev, S. S. (1971). *Stojkost' bumagorezatel'nyh nozhej [Persistence of paper cutting knives]*. Moscow: Lesnaja prom-st' [in Russian].
2. Pergament, D. A. (1990). *Broshjurovochno-perepletное oborudovanie [Bookbinding equipment]*. Moscow: MPI [in Russian].
3. Ivashhenko, V. T. (1979). *Issledovanie i optimizacija sinteza mehanizmov nozha odnonozhevyh bumagorezal'nyh mashin tipazhnogo rjada [Research and optimization of synthesis mechanisms of knife cutting machines of type series]*. L'vov: UPI [in Russian].
4. Tokmakov, B. V. (2000). *Razrabotka i proektirovanie mehanizmov nozhej skorostnyh rezal'nyh mashin [Development and design of mechanisms knives of speed cutters]*. Moscow: MGUP [in Russian].
5. Topolnytskyi, P. V. (2003). *Naukovi osnovy bezvystiinoho obrizuvannia knyzhkovo-zhurnalnykh blokiv: tekhnolohiia ta ustatkuvannia [Scientific basis of non permanent cutting of book and journal blocks: technology and equipment]*. Lviv: UPI im. Iv. Fedorova [in Ukrainian].
6. Omel'chenko, L. A. (2009). *Obrabotka koreshkov bumazhnyh blokov torcovymi frezami [Processing of root paper blocks by face milling cutters]*. Tula: TulGU [in Russian].
7. Grube, A. Je. (1971). *Derevorezhushhie instrumenty [Woodworking tools]*. Moscow: Lesnaja prom-st' [in Russian].
8. Sanjov, V. I. & Sergeevichev, A. V. (2007). *Osnovy rezanija drevesiny [Basics of wood cutting]*. St. Petersburg: SPbGLTA [in Russian].
9. Afanas'ev, O. P. & Zotov, G. A. *Sposob ocenki ostroty rezhushhih instrumentov [A method of evaluating the severity of cutting tools]* // Copyright certificate № 2337609/2508. Publish 05.12.1977.
10. Agaponov, N. N. *Sposob opredelenija radiusa zatuplenija lezvija rezhushhego instrumenta po otpechatku [Method for determining the radius of blunt of blade cutting tools for imprinting]* // Copyright certificate № 4669926/28. Publish 07.10.1991.
11. Subbotin, V. G. A. *Sposob izmerenija radiusov prituplenija kromok [Method of measurement of radius of blunt of edges]* // Copyright certificate № 3772861/25-28. Publish 15.04.1986.
12. Kulak, M. I. & Medjak, D. M. & Kulak, I. I. & Barkovskij, E. V. *Prisposoblenie dlja izmerenija shiriny lezviynogo instrumenta k mikrometru i sposob opredelenija radiusa zakruglenija rezhushhej kromki lezviynogo instrumenta [The device for measuring the width of the blade tool to the mic and method for determining the radius of curvature of the blade cutting edge tool]* // Patent № a 20130727. Publish 14.07.2016.
13. Kulak, M. I. & Marchenko, I. G. & Dolgova, T. A. (2013). *Issledovanie stojkosti nozhej bumagorezal'nyh mashin v processe jekspluatacii [Research of firmness of knife of cutting machines during operation]* *Journal of Trudy BGTU. # 9: Izdat. delo i poligrafija — Proceedings of BSTU. # 9: Publishing and Printing*, 29(33 [in Russian].



14. Kulak, M. I. & Sidel'nik, O. V. (2012). Prognozirovanie tirazhestojkosti pechatnyh form [Prediction of the plate run printing plates] *Journal of Trudy BGTU. # 9: Izdat. delo i poligrafija – Proceedings of BSTU. # 9: Publishing and Printing*, 18(22 [in Russian]).

15. Hvedchin, Ju. I. & Shostachuk, Ju. A. & Ovchar, M. (2004). *Rezal'nye mashiny i kompleksy POLAR [Cutting machines and systems POLAR]*. Kiev: PKP 'ST-Druk' [in Russian].

16. Kulak, M. I. & Kyrychok, T. Yu. & Miadziak, D. M. & Kyrychok, P. O. (2016). Kinetic Model of Optical Characteristics of Banknote Paper During Artificial Aging. *Journal of Applied Spectroscopy*, 83(4), 669–672 [in English].

17. Myshkin, N. K. & Petrokovec, M. I. (2007). *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehniczeskie prilozhenija tribologii [Friction, lubrication, wear. Physical fundamentals of tribology and technical applications]*. Moscow: Fizmatlit [in Russian].

Проаналізовано розвиток теорії різання паперу і методів вимірювання ширини ріжучої крайки леза в процесі зносу ножа. Представлено пристосування до мікрометра для вимірювання ширини лезв'їного інструменту і спосіб визначення радіуса заокруглення різальної крайки такого інструмента. Побудовано карту зносу ножа і досліджено процес зносу самогострювального ножа.

Ключові слова: різання паперу; ріжуча крайка леза; знос ножа; мікрометр; карта зносу; самогострювальний ніж.

Development of the theory of cutting of paper and methods of measurement of width of the cutting edge in the course of wear of a knife is analyzed. Device to a micrometer for measurement of the tool edge width and a way of determination of radius of a curve of the cutting edge of such tool is presented. The card of wear of a knife is constructed and process of wear of the self-sharpened knife is investigated.

Keywords: paper cutting; the cutting edge; wear of a knife; micrometer; card of wear; the self-sharpened knife.

Рецензент — Т. Ю. Киричок, д.т.н., професор,
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

Надійшла до редакції 12.10.16