

УДК 655.3

М. И. Кулак, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ);

И. В. Марченко, магистр технических наук, старший преподаватель (БГТУ);

Т. А. Долгова, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель декана (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ НОЖЕЙ БУМАГОРЕЗАЛЬНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Статья посвящена исследованию стойкости ножей бумагорезальных машин в процессе эксплуатации. Рассмотрены физические явления при резании стопы бумаги и основные факторы, определяющие износ ножей в процессе эксплуатации бумагорезальных машин. Приведены результаты экспериментальных исследований износа ножей для конкретных условий резания бумаги. Предложена математическая модель для описания процесса износа ножей.

The article is dedicated to study to stability of knives of the cutting machines in process of the usages. The physical phenomena's are considered at cutting of the ream of the paper and the main factors, defining wear-out of knives in process of the usages of the machines. The results of the experimental studies of the wear-out of knives for concrete conditions of the cutting of the paper are stated. The mathematical model is offered for description of the process of the wear-out of knives.

Введение. 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.

Предлагаемое исследование посвящено вопросам совершенствования методики прогнозирования параметров, характеризующих износостойкость режущего инструмента в процессе эксплуатации.

Физические явления при резании стопы бумаги. 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 результате исследований были проанализированы 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 спосо-

бов резания для создания новой технологии резки бумаги и резального оборудования [4–6].

Важную роль в развитии теории резания бумаги играют исследования микропроцессов, происходящих в зоне разрушения бумаги. Такие исследования раскрывают физику и микромеханику процесса резания и позволяют построить теоретически обоснованные уравнения для расчета сил резания при конкретных условиях эксплуатации бумагорезальных машин.

В соответствии со сложившимися в настоящее время представлениями процесс резания стопы происходит следующим образом [1, 2, 7]. При действии ножа на зажатую прижимом стопу она дополнительно деформируется. Постепенное увеличение нагрузки при опускании ножа сопровождается возрастанием деформаций и напряжений до достижения предела прочности бумаги.

В результате давления, оказываемого режущей кромкой на стопу, листы бумаги в стопе изгибаются вокруг ножа, в них возникают растягивающие напряжения, действующие в плоскости листа. На лист действуют силы со стороны лезвия ножа и распределенные нагрузки со стороны нижних листов по обе стороны от лезвия. Величина этих нагрузок определяет момент разрушения листа и зависит от силы трения, возникающей между ножом и листами в стопе в процессе опускания ножа. Они же определяют критическую величину растягивающих напряжений, при которой происходит разрушение листа.

Перед лезвием ножа в тот момент, когда он был вдавлен в верхнюю часть листа, образуется зона разрушенной структуры, которую называют опережающей трещиной. По мере опускания ножа трещина распространяется навстречу лезвию.

В связи с неоднородностью структуры листа разрушение его происходит либо в наиболее слабом сечении, либо в месте наибольшей концентрации растягивающих напряжений. В зависимости от угла заточки ножа разрушение происходит по-разному [7]. Чем меньше угол заточки ножа, тем меньше площадь, на которую передается усилие со стороны ножа, а следовательно, более определена и зона разрушения листа.

Характерным является то, что образование опережающей трещины независимо от угла заточки наблюдается во всех случаях только в листе, с которым в данный момент взаимодействует нож. Нижележащие листы разрушению не подвергаются. Это объясняется тем, что лезвие ножа, обтянутое листом бумаги, имеет большую площадь соприкосновения с последующим листом, чем с разрезаемым и, следовательно, создает меньшее удельное давление в плоскости резания, чем в предыдущем листе. Только после разрушения разрезаемого листа в последующем листе могут быть созданы напряжения достаточные для его разрушения.

Разделение листа бумаги происходит не только за счет нарушения связи между волокнами, но и за счет разрушения волокон. Оба процесса разрушения листа протекают одновременно, но в зависимости от места, которое разрезаемый лист занимает по высоте в стопе, один из этих процессов является преобладающим. Считается, что напряжения, необходимые для нарушения связи между волокнами в 1,5 раза меньше, чем напряжения, нужные для разрушения волокон.

О том, какой процесс преобладает при разрушении листа, судят по шероховатости поверхности обреза стопы. Если процесс происходит в основном за счет нарушения связи между волокнами, то обрез получается шероховатым. Если разделение листа происходит в основном за счет нарушения целостности волокон в плоскости резания, то обрез получается более гладким.

Независимо от того, как разрезалась стопа, ее обрез в верхней части всегда более шероховатый, чем в нижней части и чем выше стопа, тем шероховатость более выражена. Этим же объясняется некоторое возрастание усилий резания в конце резания стопы по сравнению с усилиями, возникающими в начале резания. Исключение составляет случай резания стопы на изношенном марзана, когда дорезание нижних листов происходит за счет их разрыва. Резкое увеличение сил врезания ножа в марзан в этом случае связано с вминанием листов ножом в поверхность марзана.

Основные факторы, определяющие износ ножей. Износ современного высокопроизводи-

тельного режущего инструмента представляет собой сложный физико-химический комплекс, включающий в различных сочетаниях следующие процессы [1, 8]: абразивный износ; механическое диспергирование; тепловой износ; окислительный износ; электрохимическая коррозия; электрическая эрозия.

Абразивный износ – процесс интенсивного разрушения поверхности материала при трении скольжения, обусловленный наличием абразивной среды в зоне трения и выражающийся в местной пластической деформации, микроцарапании и микрорезании абразивными частицами поверхности трения.

Абразивными частицами при резании бумаги являются частицы проклейки, частицы, попадающие в бумагу при размоле целлюлозы, кристаллические вещества пигментов краски, если бумага запечатана.

Твердые сплавы, используемые в качестве материала для бумагорезальных ножей, обладают высокой красностойкостью. Это оказывается существенным при обработке с большими скоростями резания и малыми толщинами снимаемого слоя – скоростное пиление и фрезерование бумаги и полуфабрикатов. При таких режимах работы инструмента на поверхности его режущих элементов возникает высокая температура, что ускоряет абразивный износ.

Механическое диспергирование – истирание металла режущего инструмента. В сочетании с другими факторами, диспергирование доминирует в процессе износа. Интенсивность механического диспергирования зависит от интенсивности усилий и коэффициента трения в процессе резания. Если на стадии установившегося износа определяющее влияние оказывают касательные силы резания, то на стадии усиленного износа в основном влияют нормальные силы резания.

В определенной степени механическое диспергирование металла при его износе объясняют усталостью металла от многократно повторяющихся усилий в процессе резания.

Усталостью можно также объяснить унос с граней резца карбидной фазы – самой твердой структурной составляющей. В силу многократных воздействий бумаги на лезвие ножа вначале удаляются более мягкие структурные элементы. Бумага, огибая жесткие края кристаллов карбидов, несколько глубже изнашивает связывающую их основу. Кристаллы крупных размеров начинают выступать из основного металла, что резко меняет характер износа. Бумага воздействует на выступающие части с многократным повторением нагрузки, постепенно расшатывает их, ослабляя связи с основой. При появлении усталости металла кристаллы выпадают,

увлекая за собой некоторое количество более мягкого компонента.

Тепловой износ – процесс интенсивного разрушения режущих поверхностей инструмента при их трении о бумагу и возникающем при этом нагреве.

При больших скоростях скольжения и значительном удельном давлении в тонких поверхностных слоях металла при трении образуется большое количество теплоты, которая концентрируется и не успевает отводиться вглубь. В результате поверхностные слои лезвия ножа нагреваются до высоких температур.

Износ в таких случаях происходит главным образом из-за постоянного образования и уноса текучего пластического поверхностного слоя. Подвижность поверхностных слоев весьма велика, поэтому бумага, сравнительно мягкий материал, в контакте с лезвием размазывает эти слои, что приводит к наплывам металла в зоне резания.

В условиях резания бумаги при значительном нагреве поверхностных микрослоев износоустойчивость определяется главным образом составом стали, ее теплоустойчивостью. В сталях, обладающих большой теплоустойчивостью, реакции всех структурных превращений, особенно связанных с распадом твердых растворов, происходят замедленно, что является существенным для увеличения износоустойчивости режущего инструмента.

Окислительный износ – процесс постепенного разрушения поверхности металла при трении, выражающийся в сложном сочетании явлений: адсорбции кислорода на поверхности трения; диффузии кислорода в поверхностных слоях; пластической деформации металла с образованием химических адсорбированных пленок, пленок твердых растворов, химических соединений металла с кислородом и отделением их от поверхности трения. При окислительном износе устойчивость является функцией пластичности металла, поэтому мягкая сталь менее износостойка, чем твердая. Окислительный износ ускоренно развивается в тех случаях, когда контакт скользящих поверхностей носит пульсирующий характер. Особенно интенсивно окислительное изнашивание металла протекает при сильном нагреве поверхности трения.

Электрохимическая коррозия – процесс износа металла лезвия под действием электрических зарядов, возникающих при резании бумаги. Установлено, что в процессе резания бумаги на лезвии и в слое бумаги, снимаемом им, возникают электрические заряды различной полярности. Заряды образуются в результате трения лезвия о бумагу и вследствие пьезоэлектрического эффекта при ее деформации в процессе резания. Органические кислоты, находя-

щиеся в клетках целлюлозы, при контакте с влагой образуют электролит, поэтому металл лезвия при определенных условиях резания бумаги может подвергаться электрохимической коррозии. Установление механизма электрохимической коррозии позволило разработать способы замедления процесса затупления при помощи электрического тока.

Электрическая эрозия – процесс износа поверхности металла под действием электрических искровых разрядов. Статическое электричество, возникающее при резании в результате трения лезвия о бумагу, может привести к искровым разрядам и электроэрозионному разрушению поверхности металла инструмента. На поверхности задней грани инструмента при фрезеровании книжных блоков могут образовываться кратеры от искровых разрядов.

При фрезеровании стружка заряжается отрицательно, а лезвие положительно. После выхода лезвия из контакта с блоком образуется электроискровой разряд, который при многократном повторении приводит к электрической эрозии поверхности металла и интенсифицирует износ инструмента. Для уменьшения влияния электризации на износ инструмента предусматривается снятие электрических зарядов.

Таким образом, 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 обреза сочетается с наличием влаги.

Экспериментальные исследования износа ножей бумагорезальных машин. 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.

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. Результаты измерений и последующей обработки данных приведены на рис. 1.

Экспериментальные данные были использованы для построения теоретического описания процесса износа ножа с помощью модели

предложенной в статье [11] для исследования тиражестойкости печатных форм. Логическим обоснованием для этого 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, а также инструмента для резания других материалов [8, 12].

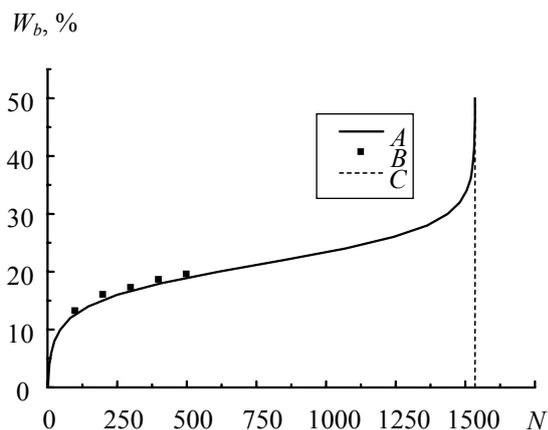


Рис. 1. Кинетика износа лезвия ножа бумагорезальной машины IDEAL по ширине режущей кромки от количества резов: A – теоретическая функция; B – данные эксперимента; C – асимптота

Естественно, 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, появляется конкурирующий, который его уравновешивает или компенсирует. Этот факт и находит отражение в кинетическом уравнении, которое описывает процесс износа [11].

Характеристикой предельного значения износа ножа в рамках рассматриваемого подхода является асимптота A. В проведенном эксперименте ее значение получилось равным $A = 1535$. Для определения стойкости ножа дополнительно необходимо вводить допустимый износ W_{Lim} . В совокупности эти два параметра позволяют определить стойкости ножа, как количество циклов резания N_{Lim} до полного затупления. В результате расчетов по методике, изложенной в статье [11], было получено $N_{Lim} = 1437$ для допустимого износа ножа $W_{Lim} = 30\%$.

Более универсальной характеристикой стойкости режущего инструмента является длина

пути резания l_{Lim} . С учетом полученных данных, она равна

$$l_{Lim} = h \cdot N_{Lim} = 16,526 \text{ м.}$$

Прямое измерение параметров ножа в процессе его эксплуатации представляет собой достаточно сложную задачу. В некоторых случаях износ определяют по изменению силы резания. В работе [13] эта методика была использована для исследования в лабораторных условиях зависимости износостойкости ножа от разрезаемых видов бумаги. В качестве примера на рис. 2 приведены экспериментальные данные, полученные в работе [13] для офсетной бумаги. Исследовалась зависимость силы резания от количества обрезанных условных книжных блоков длиной 210 мм. На рис. 2 также показаны результаты обработки данных с помощью предлагаемого теоретического подхода.

Как видно на рис. 2, наблюдается достаточно хорошее соответствие результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных, как для вертикальной, так и для горизонтальной составляющей силы резания.

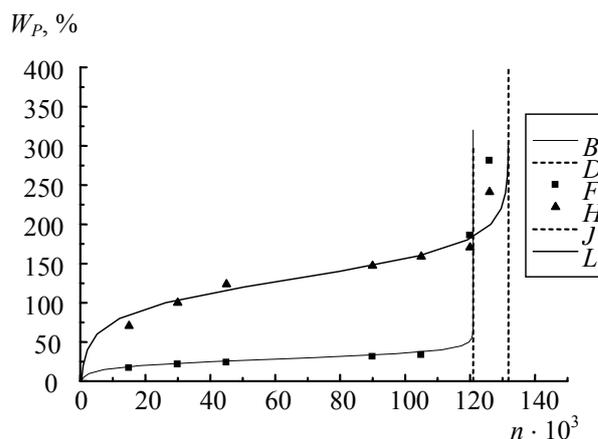


Рис. 2. Изменение сил резания P при износе ножа в зависимости от количества обрезанных условных блоков n из офсетной бумаги:

- 1) вертикальная составляющая: B – теоретическая зависимость, F – экспериментальные данные [13], D – асимптота; 2) горизонтальная составляющая: L – теоретическая зависимость, H – экспериментальные данные [13], J – асимптота

Способ резки может существенно повлиять на процесс износа ножа. На рис. 3 и 4 приведены результаты исследования безмарзанной резки типографской бумаги [14]. Как видно на рис. 3, износ ножа фактически происходит в две стадии. Стадия начального износа отличается от классической. На протяжении начальных 250 циклов резания радиус закругления режущей кромки лезвия заметным образом не изменяется.

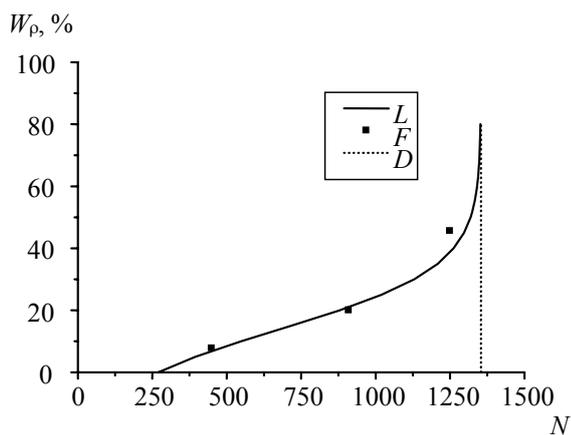


Рис. 3. Изменение радиуса закругления режущей кромки лезвия ножа ρ при износе в зависимости от количества резов N для типографской бумаги № 1: L – теоретическая зависимость; F – экспериментальные данные [14]; D – асимптота

Изменение смещения лезвия ножа относительно задней плоскости при износе, о чем свидетельствует рис. 4, происходит более медленно, но имеет аналогичный характер.

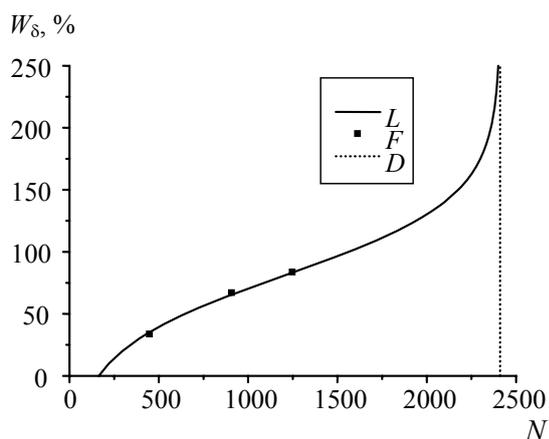


Рис. 4. Изменение смещения лезвия ножа относительно задней плоскости δ при износе в зависимости от количества резов для типографской бумаги № 1: L – теоретическая зависимость; F – экспериментальные данные [14]; D – асимптота

Вывод. Эффективность процесса резания бумаги является основой высокотехнологичных процессов в полиграфии. Опыт эксплуатации бумагорезального оборудования свидетельствует, что имеются существенные резервы для повышения его производительности и надежности в результате использования научно обоснованных рекомендаций по оптимизации параметров режущего инструмента, режимов обработки, разработки и внедрения систем оперативного контроля состояния инструмента.

Литература

1. Киселев, С. С. Стойкость бумагорезательных ножей / С. С. Киселев. – М.: Лесная промышленность, 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; УПИ. – Львов, 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; МГУП. – М., 2000. – 235 л.
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; УПІ ім. Ів. Федорова. – Львів, 2003. – 385 л.
6. Омельченко, Л. А. Обработка корешков бумажных блоков торцовыми фрезами: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Л. А. Омельченко; ТулГУ. – Тула, 2009. – 128 л.
7. Акатьев, Д. Ф. Физические явления при резании стоп бумаги плоским ножом / Д. Ф. Акатьев // Труды ВНИИОПИТ. Брошюровочно-переплетное оборудование. – М., 1973. – Вып. 45. – С. 13–22.
8. Грубе, А. Э. Дереворежущие инструменты / А. Э. Грубе. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 344 с.
9. Абаков, А. А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов / А. А. Абаков. – М.: Машгиз, 1960. – 308 с.
10. Филиппов, Г. В. Режущий инструмент / Г. В. Филиппов. – Л.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
11. Кулак, М. И. Прогнозирование тиражестойкости печатных форм / М. И. Кулак, О. В. Сидельник // Труды БГТУ. – 2012. – № 9: Издат. дело и полиграфия. – С. 18–22.
12. Хведчин, Ю. И. Резальные машины и комплексы POLAR / Ю. И. Хведчин, Ю. А. Шостачук, М. Оучар. – Киев: СТ-Друк, 2004. – 204 с.
13. Топольницький, П. В. Дослідження різального інструмента на зносостійкість / П. В. Топольницький // Поліграфія і видавничча справа. – Львів, 1998. – № 34. – С. 84–87.
14. Альтшуль, Е. А. О затуплении ножей на бумагорезальных машинах / Е. А. Альтшуль // Труды ВНИИОПИТ. Брошюровочно-переплетное оборудование. – М., 1973. – Вып. 45. – С. 3–12.

Поступила 26.03.2013