

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра «Приборостроение»

**Н. Рагрин**

**РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ,  
СТОЙКОСТНЫХ И КРИТЕРИАЛЬНОЙ  
МОДЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ**

Бишкек 2018

УДК 519. 254:004.422.6-028.77

Р 12

Рецензенты:

*М.М. Шамсутдинов*, д-р техн. наук, проф. КРСУ,

*В.А. Самсонов*, канд. техн. наук,

проф. КГТУ им. И. Раззакова,

*В.П. Тутлис*, канд. техн. наук,

проф. КГТУ им. И. Раззакова,

Рекомендовано к изданию НТС КРСУ

**Рагрин Н.А.**

Р 12 РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ, СТОЙКОСТНЫХ И КРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2018. – 82 с.

В монографии разработаны и научно обоснованы физическая, стойкостные и критериальная модели обеспечения надежности и максимальной стойкости быстрорежущих спиральных сверл для различных типов производства.

Предназначена для технических вузов и машиностроительных производств.

© ГОУВПО КРСУ, 2018

© Рагрин Н.А., 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Около 20 % станков машиностроительной промышленности являются сверлильными, без учета обработки сверлением на станках других типов, т.к. более 60 % деталей машин и механизмов имеют отверстия. Сверление – единственный способ получения отверстий резанием в сплошном материале, поэтому сверла являются одним из наиболее часто применяемых режущих инструментов. На промышленных предприятиях быстрорежущие спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8 % от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес занимают быстрорежущие спиральные сверла (около 30 %).

Существующая справочная и нормативная документация рекомендует расчет или выбор допустимой скорости резания, обеспечивающей максимальную производительность при установленном периоде стойкости. Практически все математические зависимости скорости резания и стойкости инструмента, на которые опираются существующие нормативы и справочники по обработке сверлением, получены посредством аппроксимации правой нисходящей ветви графика стойкостной зависимости для скоростей резания больших точки перегиба в пределах нормативного периода стойкости [1]. Для примера можно привести данные справочника технолога-машиностроителя [2], согласно которому нормативный период стойкости для сверл диаметром 10 мм составляет 25 минут, а расчетная скорость резания равна 27 м/мин. при рекомендуемой подаче 0,23 мм/об. В работе [3] приведены результаты производственных испытаний быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного массового производства. В работе показано, что сменная производительность автоматической линии, исходя из программы выпуска изделий, составляет 300 дет. У сверл диаметром 9,8

мм глубина сверления составляла 25,2 мм. Тогда за указанный период стойкости при скорости 27 м/мин. и подаче 0,23 мм/об. будет обработано 168 заготовок, что не позволит производить замену инструмента во время пересмен, т.е. встает необходимость останавливать процесс обработки для замены инструмента и нет гарантии безотказной работы сверл. В условиях автоматизированного массового производства время обработки сверлением не лимитирует производительность оборудования, поэтому фактические скорости резания значительно ниже рекомендуемых нормативами и справочниками и соответствует максимуму стойкостной зависимости [3].

Из вышеизложенного следует, что необходимо кардинально изменить подход к выбору условий обработки быстрорежущими спиральными сверлами, не с точки зрения обеспечения максимальной производительности при заданной стойкости, а с точки зрения обеспечения максимальной стойкости при необходимой производительности.

Отказ сверла в виде поломки приводит к остановке оборудования и, как правило, к браку при обработке изделия. Это особенно характерно для автоматизированного массового производства, в котором одновременно работает большое количество металлорежущих инструментов, когда невозможно контролировать текущее состояние каждого из них. Вместе с тем, быстрорежущие спиральные сверла широко используются и в других типах производства, где их безотказная эксплуатация не менее важна. Безотказность основной показатель надежности работы инструмента.

Поэтому разработка и научное обоснование физических, стойкостных и критериальных моделей обеспечения надежности при максимальной стойкости быстрорежущих спиральных сверл для различных типов производства – достаточно актуальная проблема.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ**

## **1.1. Условия экстремальности стойкостных зависимостей**

Сложные зависимости стойкости от скорости резания при обработке различными методами и инструментами из различных материалов получены многими авторами, которыми установлено, что эти зависимости носят экстремальный характер, с наличием «горбов» и «переломов» на кривых стойкостных зависимостей. Несмотря на многочисленность накопленных экспериментальных данных, причины появления максимумов на зависимостях стойкости инструмента от скорости и условий резания, при которых они появляются, до настоящего времени остаются недостаточно изученными.

Для объяснения причин максимумов (вершин горбов) предложены различные гипотезы, например, автор работы [4] происхождения одного или двух пиков на кривых стойкостных зависимостей объясняет законами термодинамики, применительно к термически обработанному закаленному инструменту. В работе [5] вопрос экстремальности стойкостных зависимостей увязан с толщиной стружки. Этим автор работы пытается объяснить исчезновение пиков стойкости при толстых стружках. В работах [6] немонотонность стойкостной зависимости объясняется структурными изменениями, происходящими в быстрорежущем инструменте и изменением вязкости быстрорежущей стали. Авторы работ [7, 8] считают, что наличие пика стойкости у твердосплавных инструментов связано с переходом от одного вида износа к другому. Наличие пика стойкости у твердосплавного инструмента автор работы [9] объяснил температурными изменениями механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. В работе [10] существование «горбов»

и «переломов» на кривых стойкостных зависимостей объясняется изменением природы и интенсивности преобладающего вида износа, который зависит от температуры резания. Показано, что при точении конструкционных сталей инструментом из сплава ВК8 со скоростями резания, при которых температура резания не превышает значения  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\theta < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) главную роль играет адгезионный износ, так как этой температуры резания не достаточно для диффузионного износа. Адгезионный износ протекает очень интенсивно, о чем авторы работы судят по весьма крупным вырывам частиц твердого сплава с поверхности износа. При этих температурах резания интенсивность износа твердосплавного инструмента выше, чем аналогичный показатель у быстрорежущего, что объясняется более высокой прочностью быстрорежущей стали [10]. При увеличении скорости резания ( $V > 40\text{ м/мин.}$ ) и, соответственно, повышении температуры резания ( $\theta > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) начинается снижение твердости сплава ВК8, что сопровождается повышением его пластичности и увеличением сопротивления циклическим микроконтактным нагрузкам. Сопротивление сплава ВК8 адгезионному износу возрастает. Адгезионные вырывы становятся более мелкими, стойкость резца возрастает. Такое падение интенсивности износа и возрастание стойкости продолжается до скорости резания  $V = 96\text{ м/мин.}$ , при которой температура достигает значения  $\theta = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях адгезионный износ незначителен и стойкость достигает максимума. Далее авторы работы [10] высказывают предположение, что с увеличением скорости резания, а значит – и температуры резания, отношение микротвердости твердого сплава к контактным напряжениям, очевидно, начинает падать, и интенсивность адгезионного износа возрастает. С дальнейшим увеличением скорости резания проявляется диффузионный износ. В результате суммарный износ возрастает, а стойкость инструмента быстро падает [10]. Эта гипотеза наиболее полно объясняет наличие максимума стойкостной зависимости при обработке твердосплавным инструментом, но ее нельзя применить для объяснения горбообразного характера стойкостных зависимостей при обработке быстрорежущим

инструментов по причине низкой теплостойкости последнего. Автор работы [11] указывает, что связь между скоростью резания и периодом стойкости при обработке инструментами из быстрорежущих сталей углеродистых, легированных конструкционных сталей и чугуна выражается непрерывно убывающей кривой, напоминающей гиперболу. Однако, исследования ряда авторов [12, 13, 14–17], проведенные в МВТУ им. Н.Э. Баумана, показывают, что зависимость стойкости от скорости резания при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами углеродистых сталей имеет явно выраженный горбообразный характер. Однако до настоящего времени отсутствуют гипотезы, объясняющие такой характер зависимости стойкости от скорости резания при сверлении. В существующей нормативной и технической литературе представлены рекомендации, учитывающие влияние условий обработки сверлением на стойкость спиральных сверл при работе с высокими скоростями резания  $V > 19$  м/мин. Целенаправленные исследования в диапазоне скоростей резания максимума стойкостных зависимостей не проводились. Это определило первую задачу исследований: разработка и научное обоснование физической модели стойкостной зависимости.

## 1.2. Анализ существующих стойкостных моделей

Существующие стойкостные модели получены методом одофакторного эксперимента на интенсивных скоростях резания, больших точки перегиба правой ветви графиков стойкостных зависимостей [18], стойкость в них представлена в детерминированной форме и не учитывает случайный характер процессов изнашивания. Эти стойкостные модели используются для расчета допустимых скоростей резания, максимально возможных при рекомендуемых глубине резания, подаче и заданном периоде стойкости [13]. Справочником технолога-машиностроителя [19] предложена зависимость для расчета допустимых скоростей резания при сверлении, имеющая вид:

$$V = \frac{9,8d^{0,4}}{T^{0,2}S^{0,5}}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – скорость резания,  $d$  – диаметр сверла,  $S$  – подача на оборот сверла,  $T$  – период стойкости.

Рассчитанная по зависимости (1.1) скорость резания для сверл диаметром 11 мм равна 24 м/мин. при рекомендуемой подаче 0,25 мм/об., и периоде стойкости 45 мин. В работе [20] приведен результат анализа 135 операций многоинструментальной обработки отверстий быстрорежущими спиральными сверлами диаметром от 5 до 45 мм в заготовках из углеродистых конструкционных сталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках-автоматах, который показал, что в основном используется диапазон скоростей резания 9–16 м/мин. Рассчитанный по зависимости (1.1) период стойкости для сверл диаметром 11 мм на скорости резания 15 м/мин. составил 7,68 ч. Это значение периода стойкости сравнимо со средними стойкостями, представленными в работе [21] по результатам производственных испытаний в условиях автоматизированного массового производства (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Условия и результаты производственных испытаний сверл

|                                   |      |      |      |       |       |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| Диаметр сверла $d$ , мм           | 9,8  | 10,5 | 11,5 | 13,8  | 17,5  | 21,0 | 35,0 |
| Скорость резания $V$ , м/мин      | 13,8 | 12,6 | 12,6 | 12,6  | 13,8  | 13,2 | 11,4 |
| Подача $S$ , мм/об.               | 0,22 | 0,14 | 0,18 | 0,22  | 0,2   | 0,23 | 0,23 |
| Твердость заготовок НВ            | 200  | 300  | 200  | 200   | 190   | 300  | 300  |
| Глубина сверления, мм             | 25,2 | 28,5 | 13,0 | 11,0  | 24,0  | 17,0 | 36,0 |
| Средняя стойкость до отказа, ч.   | 8,1  | 1,87 | 8,73 | 10,24 | 11,95 | 2,17 | 2,81 |
| Дисперсия стойкости $\sigma$ , ч. | 2,65 | 0,28 | 1,38 | 2,24  | 1,63  | 0,65 | 0,87 |
| Коэффициент вариации              | 0,33 | 0,15 | 0,16 | 0,22  | 0,14  | 0,3  | 0,3  |

У сверл диаметром 11,5 мм средняя стойкость равна 8,73 ч., что на 12 % отличается от рассчитанного по зависимости (1.1) периода стойкости. Период стойкости, близкий к средней стой-



кости сверл, работавших в аналогичных производственных условиях, указывает на то, что до его окончания половина сверл выйдет из строя, т.е. зависимость (1.1) не учитывает случайный характер процессов изнашивания сверл, приводящий к значительному рассеиванию их стойкости. Вместе с тем, зависимость (1.1) не учитывает твердость обрабатываемого материала, которая существенно влияет на среднюю стойкость.

Это определило вторую задачу исследований – разработку стойкостных моделей быстрорежущих спиральных сверл с учетом условий эксплуатации и случайного характера процессов изнашивания.

### **1.3. Анализ критериев отказа быстрорежущих спиральных сверл**

ГОСТ 2575-83 в пояснении к термину «Критерий отказа режущего инструмента» определяет критерий затупления режущего инструмента, как частный случай критерия отказа, характеризующегося значением износа инструмента преимущественно по задней поверхности лезвия. Предельно допустимая величина износа задней поверхности является общепринятым критерием износа режущего инструмента [13]. Методикой [22] регламентируются критерии износа спиральных сверл в виде определенной ширины фаски износа задней поверхности в зависимости от диаметра сверла, без учета случайного характера процессов изнашивания.

Известны зависимости износа задней поверхности от времени работы  $\tau$ , скорости резания  $v$  и подачи  $s$  для различных видов режущих инструментов [33]. Для быстрорежущих спиральных сверл эта зависимость имеет вид:

$$\Delta = C_{\Delta} \tau^{1,42} v^{4,85} s^{2,35},$$

где  $\Delta$  – износ задней поверхности,  $C_{\Delta}$  – постоянный коэффициент.

Очевидно, что эта зависимость не может быть использована в качестве критериальной зависимости, т.к. по ней невозможно рассчитать предельно-допустимую величину износа сверл.

Другие зависимости для расчета величины износа спиральных сверл не определены. Вместе с тем, в работе [24] показано, что износ задних поверхностей быстрорежущих спиральных сверл может служить критерием отказа только на высоких скоростях резания (21–30 м/мин.). При работе на средних и низких скоростях резания (6–16 м/мин.) имеют место другие критерии отказа, не связанные с износом задних поверхностей.

В результате лабораторных исследований и производственных испытаний были выявлены признаки потери работоспособности сверл в условиях автоматизированного производства, представленные в работе [25], появление которых предупреждает, что сверла практически потеряли работоспособность, и дальнейшая их эксплуатация в любой момент может привести к поломке инструмента. В работе [25] эти признаки определены как признаки предельного состояния сверл. Такими признаками являются:

- возникновение значительных вибраций системы СПИД при большом количестве одновременно работающих сверл одного диаметра, например, при обработке крепежных отверстий во фланцах;
- звуковые явления – «щелчки», следы прилипания обрабатываемого металла к изношенным участкам ленточек;
- выдавливание металла и появление кольцевого валика на входе в отверстие;
- появление рваных заусенцев на выходной стороне отверстия.

Причиной первых трех из вышеперечисленных признаков является износ ленточек сверл, а именно: вибрации системы СПИД при большом количестве одновременно работающих сверл появляются в результате пикообразных всплесков момента резания во время “щелчка” при защемлении изношенного участка рабочей части инструмента [25], выдавливание кольцевого валика на входе в отверстие происходит в результате большой обратной конусности на изношенных участках ленточек.

Появление рваных заусенцев на выходной стороне отверстия происходит по причине затупления и потери режущих

свойств уголков сверл, в результате чего определенная толщина обрабатываемого металла не срезается, а выдавливается при выходе сверла из отверстия. Этому способствует и размягчение обрабатываемого металла в результате возрастания температуры резания из-за большой величины износа сверл [24].

Однако в автоматизированном массовом производстве, когда контроль со стороны рабочего за состоянием каждого инструмента практически невозможен, использование указанных признаков чревато возможностью поломки инструментов, так как имеет место большое рассеивание их стойкости [21].

Это определило третью задачу исследований – разработку и научное обоснование критериальной модели быстрорежущих спиральных сверл.

На основании вышеприведенного анализа с учетом цели исследований определены *задачи исследований*:

1. Разработка и научное обоснование физической модели стойкостных зависимостей.
2. Разработка стойкостных моделей быстрорежущих спиральных сверл, обеспечивающих их безотказную работу, с учетом условий эксплуатации и случайного характера процессов изнашивания.
3. Разработка и научное обоснование критериальной модели быстрорежущих спиральных сверл, обеспечивающих их безотказную эксплуатацию.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачи исследования решались испытаниями быстрорежущих спиральных сверл в лабораторных и производственных условиях. В лабораторных условиях [24] испытания проводились со спиральными сверлами диаметром  $d = 10,2$  мм по ГОСТ 10903-77, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5. Сверлились сквозные отверстия глубиной  $3d$  в стали 45190 НВ на скоростях резания  $V = 6; 9; 12; 16; 21; 26; 30$  м/мин. и подаче  $S = 0,23$  мм/об. Испытания сверл проводились до функционального отказа – полной потери режущих свойств в результате износа рабочих элементов, участвующих в формообразовании отверстия. В процессе испытаний периодически контролировались величина износа и физическое состояние каждого из них. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла специально изготавливались из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии, отбирались по идентичности геометрических параметров и затачивались по двухплоскостной заточке с доводкой алмазным инструментом. Обработывались заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2Р135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка контролировались осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, было максимально исключено влияние случайных факторов процесса обработки.

Измерение осевой силы и момента резания производилось посредством электродинамометров УДМ-100 и УДМ-600 со стандартной усилительной и измерительной аппаратурой. Испытывались сверла с различной величиной износа конструктивных элементов [3].

Исследования влияния скорости резания на наличие и высоту нароста и на характер процесса наростообразования проводились на экспериментальном стенде, оснащённом оптико-механическим устройством [26].

Строились зависимости от скорости резания: осевой силы и момента резания сверл с наличием износа конструктивных элементов, величины нароста на уголках сверла.

В отличие от других видов металлорежущего инструмента, при обработке сверлами одного диаметра варьировать можно только двумя параметрами режима резания, скоростью резания и подачей. Для определения характера влияния подачи на стойкость сверл в диапазоне скоростей резания, соответствующего максимума стойкостной зависимости, были проведены лабораторные исследования со сверлами диаметром  $d = 14,5$  мм по ГОСТ 10903-77, изготовленными из быстрорежущей стали Р6М5. Сверлились сквозные отверстия глубиной  $3d$  в стали 45 190НВ при скоростях резания  $V = 12$  и  $16$  м/мин. и подачах  $S = 0, 18, 0,3$  и  $0,4$  мм/об. Определялась наработка до достижения износа задних поверхностей величины равной нормативному критерию износа сверл данного диаметра  $h_{3н} = 0,5$  мм [27]. В процессе исследований через каждые 50–100 отверстий контролировался износ задних поверхностей ( $h_3$ ) и ленточек ( $K_{л}$ ) сверл.

В производственных условиях [1] испытывались партии спиральных сверл по ГОСТ 10903–77 из стали Р6М5 различных диаметров, по 25 шт. каждого диаметра, при обработке заготовок из углеродистых конструкционных сталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках-автоматах. Сверла эксплуатировались до появления признаков потери работоспособности, за которыми следует функциональный отказ [25]. Результаты испытаний обрабатывались методами аппроксимации, математической статистики и теории корреляции.

## ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОЙКОСТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

### 3.1. Закономерности формирования максимума зависимостей стойкости и наработки спиральных сверл от скорости резания

В работе [24] приведены результаты лабораторных исследований с быстрорежущими спиральными сверлами 10,2 мм, которые позволили получить стойкостные зависимости, отражающие связь стойкости и наработки до функционального отказа спиральных сверл со скоростью резания. Графики зависимостей представлены на рисунке 3.1.

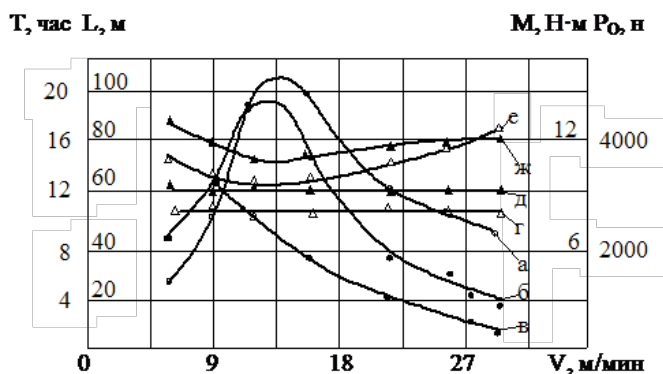


Рисунок 3.1 – Графики зависимостей наработки, стойкости, сил и моментов резания от скорости резания

На рисунке 3.1 зависимости от скорости резания: а) – наработки до функционального отказа в метрах, б) – стойкости до функционального отказа в часах, в) – стойкости до установленного отказа – достижения принятого равного износа лезвия в соответствии с методикой [22], г) – осевой силы острых сверл,

д) – момента резания острых сверл, е) – осевой силы сверл с наличием износа, ж) – момента резания сверл с наличием износа.

Экспериментальные зависимости стойкости и наработки до функционального отказа от скорости резания при обработке углеродистых конструкционных сталей быстрорежущими спиральными сверлами получены впервые. Общепринято при проведении экспериментальных исследований строить зависимости стойкости до установленного отказа от скорости резания, для построения которых принимают равные величины износа лезвия для каждой скорости резания и определяют время работы инструмента до достижения принятого равного износа лезвия [22].

На рисунке 3.1 видно, что зависимость наработки до функционального отказа (кривая а) аналогична зависимости стойкости до функционального отказа (кривая б), графики обеих стойкостных зависимостей имеют экстремальный горбообразный вид с максимумом в диапазоне скоростей резания  $12 \div 16$  м/мин.

### **3.2. Связь между скоростью резания и стойкостью сверл**

Общепринято, что связь между скоростью резания и стойкостью режущего инструмента может быть монотонной, выраженной непрерывно падающей кривой, близкой к гиперболе, или немонотонной, выраженной кривой с двумя перегибами [13]. При этом первая кривая характерна для инструмента из быстрорежущих сталей, а вторая – для инструментов, оснащенных твердым сплавом [28].

На рисунке 5.1, в, показан график зависимости стойкости до установленного отказа от скорости резания сверл диаметром 10,2 мм, полученный в соответствии с методикой [22]. Для построения этого графика была принята равная величина износа лезвий  $h_3 = 0,45$  мм. Износ лезвий, равный величине  $h_3 = 0,45$  мм, является рекомендуемым нормативами [29] критерием износа сверл данного диаметра. В диапазоне скоростей  $9 \div 30$  м/мин. график этой зависимости имеет вид непрерывно падающей кривой,

близкой к гиперболе. При работе сверл со скоростью 6 м/мин. износ лезвий не достиг нормативного критерия.

На рисунке 3.2 приведены зависимости стойкости токарных резцов из быстрорежущей стали P18 и твердого сплава T15K6 от скорости резания, полученные экспериментальным путем с использованием равной величины износа лезвия, представленные в работе [28].

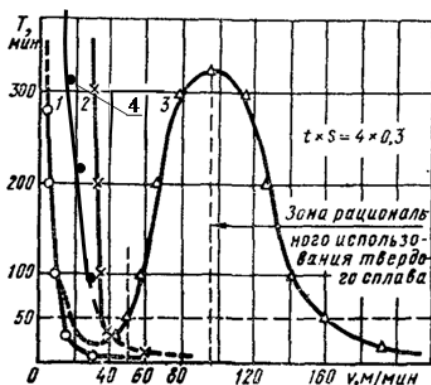


Рисунок 3.2 – Зависимость стойкости от скорости резания, где 1 – резец из стали У12; 2 – резец из стали Р18; 3 – резец с пластижкой твердого сплава Т15К6; 4 – зависимость стойкости до установленного отказа от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл из стали Р6М5 по результатам лабораторных исследований

Кривая зависимости стойкости до установленного отказа от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл, полученная по результатам лабораторных исследований со сверлами диаметром 10,2 мм (рисунок 3.1, кривая в), представлена на рисунке 3.2 (кривая 4) [30]. Как видно из рисунка 3.2, характер кривой 4 достаточно близок характеру кривой 2. Из этого следует, что зависимость стойкости до установленного отказа от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл из стали Р6М5 аналогична зависимости стойкости от скорости резания



резца из быстрорежущей стали P18. То есть в диапазоне скоростей  $9\div 30$  м/мин. скорость резания аналогично влияет на износ лезвий сверл из стали P6M5 и резцов из стали P18. Однако сравнение кривых а, б и в, представленных на рисунке 3.1, показывает, что использование равной величины износа лезвия дает искаженную картину характера влияния скорости резания на стойкость быстрорежущих спиральных сверл. В диапазоне скоростей  $9\div 16$  м/мин. характеры зависимостей (рисунок 3.1, кривая в) и (рисунок 3.1, кривые а, б) не совпадают. В данном случае при использовании равной величины износа лезвия практически оценивается не стойкость инструмента, а время достижения принятой величины износа лезвия. Анализ литературных источников показал, что до настоящего времени не разработаны научные гипотезы, объясняющие экстремальный горбообразный характер стойкостных зависимостей от скорости резания при сверлении, поэтому исследования закономерностей максимума этих зависимостей является существенной научной задачей. В работах [31, 2] показано, что диапазон скоростей резания максимума стойкостных зависимостей широко используется в автоматизированном массовом производстве, поэтому задача определения скорости резания, соответствующей максимальной стойкости сверл имеет существенную практическую значимость для автоматизированного массового и других типов производства, где операция сверления не лимитирует производительность оборудования.

Исходя из этого, определилась задача исследования – раскрытие закономерностей формирования максимума стойкостных зависимостей от скорости резания и влияния на него условий обработки деталей из углеродистых конструкционных сталей быстрорежущими спиральными сверлами.

### 3.3. Физические процессы в диапазоне скоростей резания максимума стойкостных зависимостей спиральных сверл

На рисунке 3.1 приведены зависимости влияния скорости резания на физические характеристики процесса сверления быстросрежущими спиральными сверлами полученные в результате лабораторных исследований. На представленном рисунке видно, что при сверлении острыми сверлами графики зависимостей осевой силы и момента резания от скорости резания имеют линейный вид и параллельны оси абсцисс, т.е. влияние скорости резания отсутствует (рисунок 3.1, кривые г, д). При сверлении сверлами с износом конструктивных элементов вид данных графиков меняется, они принимают экстремальный вид с минимумом (рисунок 3.1, кривые е, ж) [3]. Скорости резания минимума на графиках зависимостей осевой силы и момента резания сверл с износом конструктивных элементов совпадают со скоростями резания максимума стойкостных зависимостей. Минимальные осевые силы и моменты резания при работе сверл с наличием износа конструктивных элементов могут быть результатом воздействия нароста, который, как известно, увеличивает передний угол  $\gamma$  и тем самым уменьшает все составляющие силы резания [13]. При работе со скоростями  $12\div 16$  м/мин. имел место хорошо развитый нарост (рисунок 3.3).

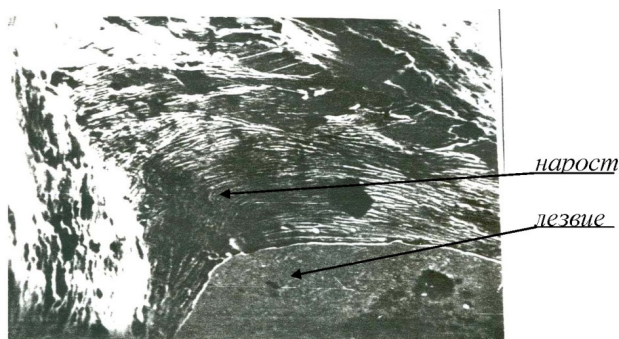


Рисунок 3.3 – Срез режущего лезвия перпендикулярно главной режущей кромке, скорость 16 м/мин.

Нарост в таком виде не наблюдался при работе сверл, как с меньшими, так и с большими скоростями резания [32].

При работе острыми сверлами нарост отсутствовал, что подтверждается линейным характером динамических зависимостей [3]. В работах автора [32, 26] показано, что в диапазоне скоростей резания максимума стойкостных зависимостей нарост достигает максимальной величины (рисунок 3.4).

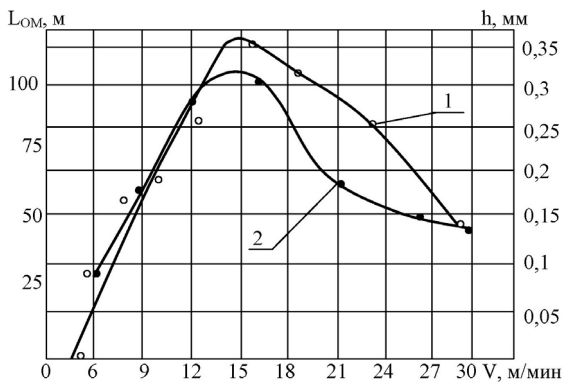


Рисунок 3.4 – Влияние скорости резания на наработку сверл и высоту нароста

На рисунке 3.4 кривая 1 – зависимость высоты нароста от скорости резания при точении уголком лезвия спирального сверла [26], рисунок 3.4, кривая 2 – зависимость наработки до функционального отказа от скорости резания.

Нарост, являясь режущим клином, защищает главные режущие кромки от разрушения в результате износа, поэтому они оставались работоспособными при ширине фаски износа лезвий 1,3 мм (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Величина износа лезвий при отказе сверл по результатам лабораторных исследований со сверлами

| $V, \text{ м/мин.}$                   | 6    | 9    | 12   | 16  | 21   | 26   | 30   |
|---------------------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|
| $h_3, \text{ мм при отказе}$          | 0,42 | 0,45 | 1,0  | 1,3 | 0,9  | 0,9  | 0,8  |
| $K_{\text{л}}, \text{ мм при отказе}$ | 17   | 19   | 20   | 15  | 13   | 11   | 10   |
| $\Delta d, \text{ мм при отказе}$     | 0,13 | 0,22 | 0,24 | 0,2 | 0,16 | 0,16 | 0,15 |

Сохранение работоспособности главных режущих кромок при такой величине износа лезвий может быть только результатом наличия нароста, который увеличивает задний угол  $\alpha$  и тем самым уменьшает площадь контакта изношенных участков лезвий с поверхностью резания.

### 3.4. Влияние скорости резания на интенсивность износа конструктивных элементов сверл

На рисунке 3.5 представлены графики зависимостей интенсивности износа лезвий, ленточек и уголков сверл диаметром 10,2 мм, полученные в результате лабораторных исследований [24].

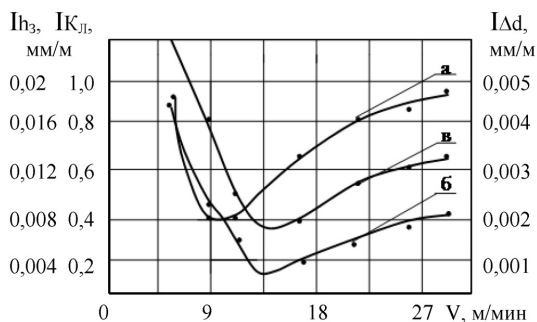


Рисунок 3.5 – Влияние скорости резания на интенсивность износа конструктивных элементов сверл

На рисунке 3.5: а) зависимость интенсивности износа лезвий от скорости резания  $I_{лз} = f(V)$ , б) зависимость интенсивности износа ленточек от скорости резания  $I_{кл} = f(V)$ , в) зависимость интенсивности износа уголков от скорости резания  $I_{лд} = f(V)$ .

На представленном рисунке видно, что интенсивность износа лезвий имеет значительную величину при скорости 6 м/мин., что можно объяснить абразивным воздействием твердых микрокомпонентов материала обрабатываемых заготовок, таких как цементит и сложные карбиды, твердость которых соизмерима с твердостью быстрорежущей стали. В основном цементит содержат углеродистые инструментальные стали, которые теряют

свои режущие свойства при температуре резания  $\theta \geq 200^{\circ}\text{C}$  [13], поэтому с увеличением температуры резания обрабатываемый материал теряет свои абразивные свойства. В диапазоне скоростей  $9 \div 12$  м/мин. интенсивность износа лезвий имеет минимальное значение.

При дальнейшем увеличении скорости резания температура резания растет, что приводит к максимальному значению нароста при температуре резания  $\theta \approx 300^{\circ}\text{C}$  [32]. Нарост не постоянен по форме и высоте. Верхняя менее прочная его часть разрушается, а затем вновь нарастает до предельной для конкретных условий высоты, при этом одна часть разрушенного нароста уносится стружкой, а другая поверхностью резания. Отделившиеся частицы нароста царапают лезвия инструмента. По этой причине интенсивность износа лезвий сверл резко возрастает с увеличением скорости резания выше 9 м/мин. (рисунок 3.4, кривая а), что противоречит столь же резкому увеличению стойкости и наработки (рисунок 3.1, кривые а, б, левые ветви). На изношенных участках лезвий сверл, работавших с этими скоростями резания, имели место глубокие борозды и пики износа (рисунок 3.6, в, г), которые отсутствовали при работе, как с меньшими, так и с большими скоростями резания.

При работе со скоростями  $21 \div 30$  м/мин. в результате дальнейшего увеличения температуры резания высота нароста уменьшается, а затем он полностью исчезает, в связи с этим, и глубина борозд на изношенных участках лезвий уменьшается, а затем они полностью исчезают, изношенные участки становятся гладкими (рисунок 3.6, д, е, ж). Увеличение температуры резания приводит к потере твердости и прочности инструментального материала и к увеличению интенсивности износа лезвий (рисунок 3.5, кривая а). В этом диапазоне скоростей резания сверла выходили из строя из-за износа лезвий, что приводило к резкому повышению температуры резания к моменту отказа сверл. Непосредственно перед отказом появлялись цвета побежалости на стружке, а отказ происходил в результате разупрочнения и полной потери режущих свойств главных режущих кромок у уголков сверл (рисунок 3.6, з) [33].

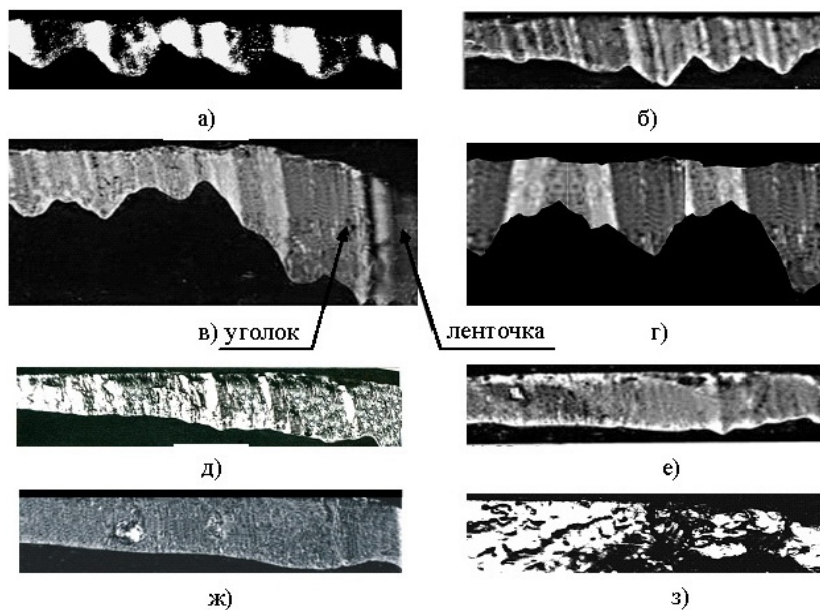


Рисунок 3.6 – Вид износа лезвий перед отказом сверл, где скорости резания: а) – 6 м/мин., б) – 9 м/мин., в) – 12 м/мин., г) – 16 м/мин., д) – 21 м/мин., е) – 26 м/мин., ж) – 30 м/мин., з) – вид лезвия у уголка при скорости 30 м/мин.

Ленточки острых сверл на участках, являющимися вспомогательными задними поверхностями, работают в сплошном контакте с поверхностью резания из-за отсутствия задних углов. Это способствует их интенсивному износу и образованию прямой конусности на значительных участках рабочей части сверла (таблица 3.1), как показано в работах автора [2, 33, 34, 35].

При работе с низкими скоростями ( $6 \div 9$  м/мин.) разбивка обрабатываемых отверстий относительно невелика, а интенсивность уменьшения разбивки в процессе износа сверл значительная (рисунок 3.7).

Уменьшение разбивки при работе с низкими скоростями резания связана с высокой интенсивностью износа уголков сверл (рисунок 3.6, кривая в, левая ветвь графика). В результате этого

наступает момент, когда диаметр обрабатываемого отверстия становится меньше первоначального диаметра сверла, то есть изношенные участки ленточек находятся в сплошном контакте с поверхностью обрабатываемого отверстия. С этого момента работу сверл, вплоть до их отказа, сопровождают звуковые явления «скрип». Отказ сверл происходил в результате защемления изношенного участка рабочей части сверла в обрабатываемом отверстии (рисунок 3.8) [2].

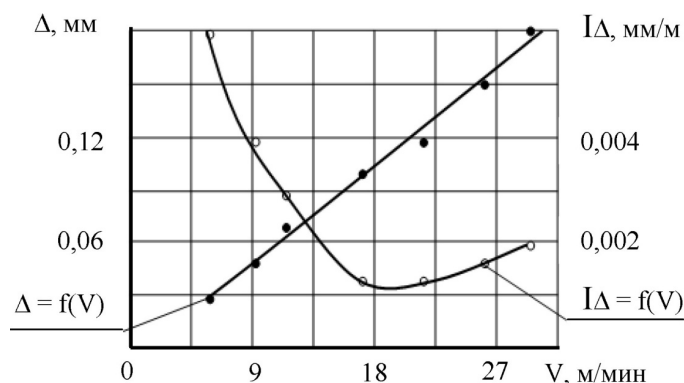


Рисунок 3.7 – Влияние скорости резания на разбивку обрабатываемых отверстий  $\Delta$  острыми сверлами, и на интенсивность уменьшения разбивки  $I_{\Delta}$  в процессе износа сверл

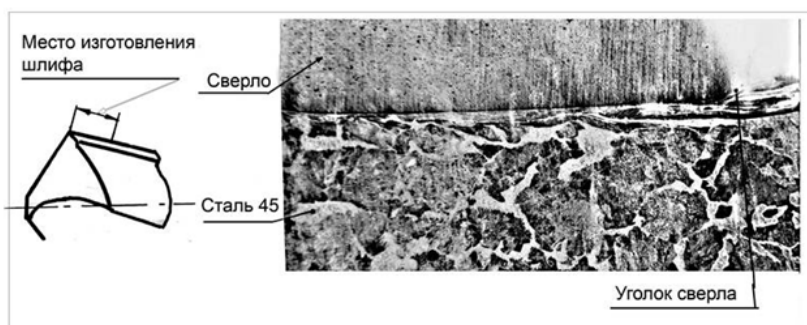


Рисунок 3.8 – Контакт ленточки с обрабатываемой поверхностью в момент разрушения сверла

Непосредственно перед отказом возникали характерные звуковые явления «щелчки», являющиеся результатом защемления рабочей части инструмента и появлялись налипы материала обрабатываемых заготовок на изношенных участках ленточек в местах контакта с обработанной поверхностью.

При увеличении скорости резания температура резания повышается. В свою очередь износ сверл приводит к повышению температуры резания, к размягчению материала обрабатываемых заготовок и облегчению относительного скольжения изношенных участков ленточек по обработанной поверхности. При работе со скоростями 12–16 м/мин., соответствующими области максимума стойкостных зависимостей, сверла начинали «скрипеть» при определенной величине износа ленточек, но при дальнейшем нарастании износа «скрип» прекращался, и сверла продолжали работать. В этом диапазоне скоростей резания интенсивность износа ленточек минимальная (рисунок 3.6, кривая б), налипы материала обрабатываемых заготовок на изношенных участках ленточек не наблюдались, как и характерные для меньших скоростей резания звуковые явления «щелчки» [36].

При дальнейшем увеличении скорости резания интенсивность износа ленточек растет (рисунок 3.6, кривая б) вследствие дальнейшего увеличения температуры резания, уменьшения твердости и прочности быстрорежущей стали. Увеличение разбивки отверстия (рисунок 3.7) исключает защемление изношенного участка ленточек в обрабатываемом отверстии.

### **3.5. Износ уголков в диапазоне скоростей резания максимума стойкостной зависимости**

На основании вышеизложенного можно предположить, примерно равный вклад износов лезвий и ленточек к потере работоспособности сверл в диапазоне скоростей резания, соответствующих области максимума стойкостной зависимости. Можно утверждать, что отказ сверл в этом диапазоне скоростей резания происходит по причине потери работоспособности уголков.



Основным признаком потери работоспособности сверл при работе со скоростями  $12 \div 16$  м/мин., является появление рваных заусенцев на выходной стороне отверстия [25]. Причиной появления заусенцев может быть только потеря режущих свойств уголков. Они не срезают определенный слой металла, а выдавливают его наружу, при этом немаловажную роль играет возрастание температуры резания, размягчающей обрабатываемый материал.

Выше было сказано, что главные режущие кромки защищает от разрушения нарост. В виду того, что максимальная температура резания имеет место на уголках сверл, именно здесь появляется хорошо развитый нарост (рисунок 3.9) [26].



Рисунок 3.9 – Нарост на уголке сверла

При возрастании износа и температуры резания нарост распространяется вдоль главной режущей кромки в направлении перемычки, о чем свидетельствует вид изношенных участков лезвий сверл. Пики износа меньшей величины, чем у уголков, наблюдаются вдоль главной режущей кромки инструмента (рисунок 3.10).

Распространение нароста вдоль главных режущих кромок подтверждается появлением минимума на графиках зависимостей осевой силы и момента от скорости резания (рисунок 3.1,

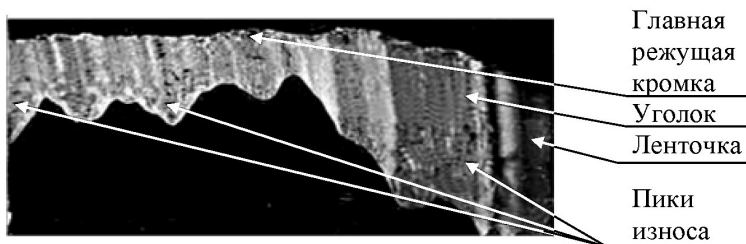


Рисунок 3.10 – Вид износа лезвия при скорости 12 м/мин.

кривые е, ж), т.к. его максимальная величина совпадает с максимумом стойкостных зависимостей (рисунок 3.4) [26]. Вследствие нарастания износа наступает момент, когда температура резания на уголках превышает температуру, соответствующую максимальной величине нароста  $\theta \approx 300^\circ\text{C}$ . В результате повышения температуры нарост на уголках уменьшается и перестает служить режущим клином, уголок теряет режущие свойства и в этот момент появляется заусенец на выходной стороне отверстия.

### 3.6. Закономерности горбообразного характера зависимостей стойкости и наработки спиральных сверл от скорости резания

На основании вышеизложенного можно выделить две основные закономерности горбообразного характера зависимостей стойкости и наработки от скорости резания.

Первая закономерность – влияние скорости резания на интенсивность износа ленточек и стойкость сверл в диапазоне скоростей  $6 \div 16$  м/мин. Этот диапазон можно разделить на две части:

- **первая** – скорости 6–9 м/мин., где интенсивность износа ленточек высокая, а стойкость относительно низкая. Сверла выходят из строя в результате защемления изношенных участков ленточек в обрабатываемом отверстии, и превалирующим в потере работоспособности сверл является износ ленточек;

- **вторая** – скорости 12–16 м/мин., где интенсивность износа ленточек минимальная, а стойкость сверл максимальная. При работе с этими скоростями резания принять однозначный вывод о превалирующем влиянии износа ленточек на потерю работоспособности спиральных сверл не представляется возможным.

Вторая закономерность – влияние скорости резания на работоспособность лезвий и стойкость сверл в диапазоне скоростей 12÷30 м/мин. Этот диапазон также можно разделить на две части:

- **первая** – скорости 12–16 м/мин., при которых наблюдается активное наростообразование в результате чего главные режущие кромки сохраняют режущие свойства при большой величине износа лезвий вплоть до потери работоспособности сверл. При работе с этими скоростями резания принять однозначный вывод о превалирующем влиянии износа лезвий на стойкость сверл не представляется возможным;
- **вторая** – диапазон скоростей 21÷30 м/мин., при которых стойкость относительно небольшая, а превалирующим в потере работоспособности сверл является износ лезвий. Сверла выходят из строя из-за разупрочнения и полной потери режущих свойств главных режущих кромок в результате резкого возрастания температуры резания.

Таким образом, при скоростях 12–16 м/мин. интенсивность износа ленточек минимальная, а главные режущие кромки от разрушения защищает нарост. Эти конструктивные элементы продолжают выполнять свои функции вплоть до потери работоспособности инструмента. При работе этими скоростями имеет место равноценное влияние износов лезвий и ленточек на потерю работоспособности сверл. Максимальная работоспособность ленточек и лезвий и их равноценное влияние на потерю работоспособности инструмента обуславливает максимальную стойкость спиральных сверл.

### 3.7. Влияние условий обработки на характер стойкостной зависимости и характеристики ее максимума

Характер стойкостной зависимости выражается крутизной ее левой и правой ветвей и положением максимума. Максимум является наиболее значимым признаком характера зависимостей стойкости и наработки от скорости резания. Стойкость является количественной характеристикой максимума, а скорость резания – его качественной характеристикой [37].

Однако на стойкость сверл помимо скорости резания существенно влияют подача, глубина резания и твердость материала заготовок.

Авторы работы [18] при анализе влияния подачи на характер стойкостной зависимости показывают, что для всех значений подач сохраняется один и тот же вид функциональной зависимости  $T = f(V)$ . С увеличением подачи уменьшается количественное значение стойкости, при этом для всех подач максимум стойкости  $T_{\max}$  имеет место при одной и той же скорости  $V_{T\max}$ , как показано на рисунок 3.11, б.

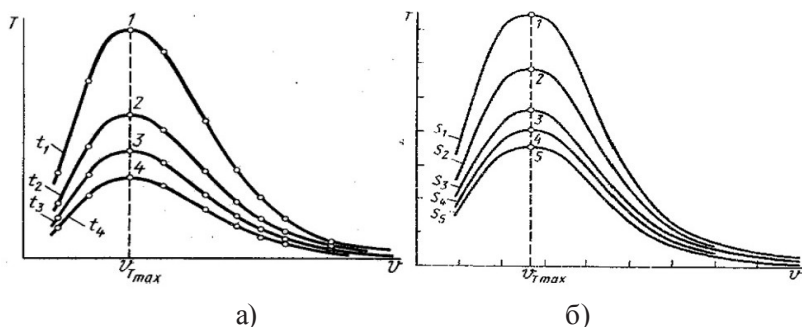


Рисунок 3.11 – Влияние глубины резания  $t$  (а)  
и подачи  $S$  (б) на характер стойкостной зависимости [20]

Влияние глубины резания на характер стойкостной зависимости, по мнению авторов работы [18], аналогично влиянию подачи. Построение кривых зависимости  $T = f(V)$  при различных

значениях глубины резания показывает, что характер семейства кривых в этом случае такой же, как и при изменении подачи, то есть для всех значений  $t$  максимум стойкости  $T_{\max}$  имеет место при одной и той же скорости резания  $V_{T_{\max}}$ , уменьшается лишь количественное значение стойкости с увеличением глубины резания (рисунок 3.11, а).

При сверлении глубина резания равна половине диаметра сверла  $t = d/2$ . Однако в существующих математических зависимостях для расчета стойкости сверл и допустимой скорости резания диаметр сверла имеет положительную степень [13, 18, 19, 28, 38 и др.], то есть с увеличением диаметра стойкость сверл и допустимая скорость резания возрастает. В работе [18] не приведен анализ причин и факторов, в результате воздействия которых, имеют место, показанные на рисунке 3.11, влияние подачи и глубины резания на характер стойкостной зависимости и на ее максимум.

В работе [13] показано, что подача на стойкость влияет в большей степени, чем глубина резания, не зависимо от вида обработки. Автор работы [13] объясняет это влиянием подачи на температуру резания, в формулах, для расчета которой при обработке стали, показатель степени подачи превышает показатель степени глубины резания для всех видов обработки. В существующих литературных источниках практически отсутствует анализ влияния подачи, глубины резания и твердости материала заготовок на характер стойкостной зависимости и на ее максимум.

Результаты исследований, приведенные в работе [24] и представленные выше позволяют сделать вывод, что влияние вышеперечисленных условий обработки на характер стойкостной зависимости и на ее максимум отражает влияние интенсивностей износа лезвий и ленточек.

На интенсивность износа лезвий в основном влияет температура резания. Например, при работе с низкими скоростями резания, а значит и с низкой температурой резания, интенсивность износа лезвий зависит от абразивного воздействия

материала обрабатываемых заготовок посредством твердых микрокомпонентов, таких как цементит и сложные карбиды, абразивные свойства которых уменьшаются с ростом температуры резания и полностью исчезают при температуре резания  $\theta \geq 200$  °С. При работе со скоростями резания активного наростообразования соответствующими максимуму стойкостной зависимости максимальная высота нароста, защищающего главные режущие кромки, имеет место при температуре резания  $\theta \approx 300$  °С. При работе с высокими скоростями резания быстро-режущая сталь теряет режущие свойства при температуре резания  $\theta \geq 600$  °С. Поэтому следует ожидать, что влияние подачи, диаметра сверла и твердости материала обрабатываемых заготовок на интенсивность износа лезвий будет сказываться через их воздействие на температуру резания.

На интенсивность износа ленточек в основном влияет величина разбивки обрабатываемых отверстий и физико-механические свойства материала обрабатываемых заготовок, от которых зависит абразивный износ [24]. Разбивка обрабатываемых отверстий уменьшается при уменьшении скорости резания [31], хотя основное влияние на разбивку оказывает не скорость резания, а величина и частота колебаний технологической системы, связанная с частотой вращения шпинделя станка. Например, при увеличении диаметра сверла без изменения скорости резания, условия изнашивания лезвий в худшую сторону не изменяются. Уменьшается частота вращения шпинделя станка и частота колебаний технологической системы, что приводит к уменьшению разбивки обрабатываемых отверстий, тем самым условия изнашивания ленточек ухудшаются. Что касается материала обрабатываемых заготовок, из двух его характеристик физико-механических свойств: предел прочности  $\sigma_b$  и твердость HB, на его абразивную способность основное влияние оказывает твердость HB. Поэтому на интенсивность износа ленточек основное влияние будут оказывать частота вращения шпинделя станка и твердость материала обрабатываемых заготовок HB.

### 3.7.1. Влияние подачи

В работе [24] показано, что в диапазоне низких скоростей резания меньших 12 м/мин., левая ветвь графика стойкостной зависимости, работоспособность сверл зависит от износа ленточек. В диапазоне высоких скоростей резания больших 16 м/мин., правая ветвь графика стойкостной зависимости, работоспособность сверл зависит от износа лезвий. В диапазоне скоростей резания, соответствующих максимуму – максимуму стойкостной зависимости (12–16 м/мин.) имеет место равноценное влияние износов лезвий и ленточек на потерю работоспособности сверл. Работоспособность ленточек и лезвий здесь максимальная, что обуславливает максимальную стойкость сверл. В этом диапазоне скоростей резания нарост, защищающий главные режущие кромки имеет максимальную величину, а интенсивность износа ленточек минимальная. Отмечено, что минимальная интенсивность износа ленточек совпадает с максимальной стойкостью сверл, что является обязательным условием максимума.

Результаты лабораторных исследований и производственных испытаний, представленные в работе [27], для указанного диапазона скоростей резания позволяют сделать такой же вывод в отношении подачи. То есть на скоростях 12–16 м/мин. имеют место рациональные подачи, зависящие от диаметра сверла, при которых работоспособность ленточек и лезвий, а значит и стойкость сверл максимальная. Для сверл диаметром 10,2 мм рациональная подача равна 0,23 мм/об.

Подача влияет на интенсивность износа лезвий через температуру резания. При увеличении подачи температура резания увеличивается. Максимальной величины нарост достигнет при меньших скоростях резания. Характер зависимости интенсивности износа лезвий от скорости резания изменится. Максимум графика зависимости сместится по оси абсцисс в сторону низких скоростей резания. Крутизна правой ветви графика увеличится. При уменьшении подачи температура резания уменьшится, что также повлечет за собой изменение характера зависимости интенсивности износа лезвий от скорости резания. Максимальной величины нарост достигнет при больших скоростях резания.

Максимум сместится по оси абсцисс в сторону высоких скоростей резания. Увеличится крутизна левой ветви графика этой зависимости. Из этого следует, что в том случае если бы стойкость сверл зависела только от износа лезвий, подача оказывала бы влияние на скорость резания максимума стойкостной зависимости. Однако в работе [27] показано, что при уменьшении подачи увеличивается интенсивность износа ленточек сверл, так как в этом случае увеличивается путь трения ленточек об обработанную поверхность при неизменной глубине сверления. Ранее было отмечено, что интенсивность износа ленточек увеличивается с уменьшением разбивки обработанных отверстий, которая уменьшается с уменьшением скорости резания [24]. То есть при уменьшении подачи от ее рациональной величины в диапазоне низких скоростей резания интенсивность износа ленточек существенно возрастет. Характер зависимости интенсивности износа ленточек от скорости резания изменится. Увеличится крутизна левой ветви графика и положение его максимума относительно оси ординат при сохранении его положения относительно оси абсцисс, то есть скорость резания максимума останется неизменной, при увеличении интенсивности износа ленточек.

Увеличение подачи относительно рациональной величины уменьшит путь трения ленточек об обработанную поверхность, а повышение температуры резания при этом в некоторой степени снизит абразивную способность материала обрабатываемых заготовок, что благоприятно скажется на интенсивности износа ленточек, особенно в диапазоне низких скоростей резания. Это также повлечет за собой изменение характера зависимости интенсивности износа ленточек от скорости резания. Крутизна левой ветви графика уменьшится, как и положение его максимума относительно оси ординат. Однако, как уже было сказано выше, увеличение подачи неблагоприятно скажется на интенсивности износа лезвий, особенно в диапазоне высоких скоростей резания. При изменении подачи относительно ее рациональной величины изменится степень влияния износов лезвий и ленточек на потерю работоспособности сверл. Равноценность их влияния в диапазоне скоростей резания максимума стойкостной зависи-



мости нарушится. Увеличение подачи приведет к превалирующему влиянию износа лезвий на стойкость сверл, тогда как при ее уменьшении превалирует износ ленточек. В конечном итоге и то и другое приведет к снижению стойкости сверл. В работе автора [27] показано, что при скоростях 12 м/мин. и 16 м/мин. уменьшение подачи от 0,23 мм/об. до 0,18 мм/об., уменьшает стойкость сверл в 1,3 раза, а увеличение подачи от 0,23 мм/об. до 0,4 мм/об. – в 1,75 раза.

Из вышеизложенного следует, что изменение подачи от ее оптимальной величины уменьшает стойкость сверл, но не изменит скорости резания максимума стойкостной зависимости, т.е. изменится количественная характеристика максимума без изменения его качественной характеристики. Характер стойкостной зависимости при изменении подачи будет изменяться так, как это показано на рисунке 3.12, на котором: 1 –  $S = 0,18$  мм/об.; 2 –  $S = 0,23$  мм/об.; 3 –  $S = 0,4$  мм/об.

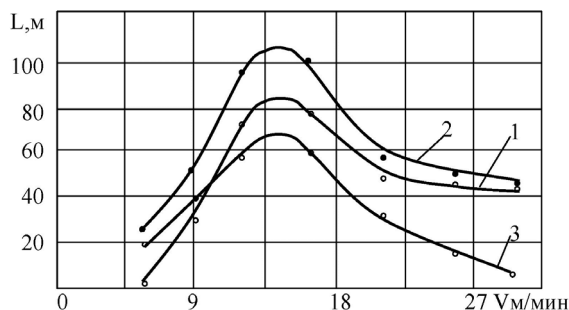


Рисунок 3.12 – Влияние подачи на характер стойкостной зависимости

При уменьшении подачи увеличится крутизна левой ветви графика стойкостной зависимости, а при увеличении подачи увеличится крутизна его правой ветви. В диапазоне низких скоростей резания при уменьшении подачи работоспособность ленточек снижается, а степень влияния их износа на стойкость сверла возрастет, а в диапазоне высоких скоростей резания работоспособность лезвий снижается при увеличении подачи, и возрастет степень влияния их износа на стойкость сверла.

### 3.7.2. Влияние глубины резания

Из трех параметров режима резания при сверлении, глубина резания практически не оказывает влияния на температуру резания. В приведенной в работе [13] формуле для расчета температуры резания при сверлении стали, влияние глубины резания не учитывается. При сверлении глубина резания равна половине диаметра сверла. Увеличение диаметра сверла с одной стороны увеличивает ширину срезаемого слоя, равную длине главной режущей кромки, что должно привести к повышению температуры резания, а с другой стороны теплоотвод в тело сверла увеличивается, что приводит к снижению температуры резания. Поэтому увеличение диаметра сверла, при неизменных скорости резания и подаче, практически не изменяет температуру резания, и, соответственно, не будет оказывать существенного влияния на характер зависимости интенсивности износа лезвий от скорости резания, что нельзя сказать в отношении интенсивности износа ленточек. При увеличении диаметра сверла для обеспечения постоянной скорости резания снижают частоту вращения шпинделя станка, и частоту колебаний технологической системы, разбивка обрабатываемых отверстий уменьшается, ухудшаются условия работы ленточек.

В работе автора [39] приведена зависимость разбивки обработанных отверстий от скорости резания, полученная в результате лабораторных исследований со сверлами диаметром 10,2 мм. На рисунке 3.13 показан график данной зависимости, на котором по оси абсцисс вместо скорости резания показана частота вращения шпинделя станка. Как видно из представленного рисунка, при значениях частоты вращения шпинделя станка меньших  $n < 300$  об./мин. разбивка обрабатываемых отверстий снижается до значений, меньших  $\Delta < 0,06$  мм. По этой причине при работе со скоростями резания, соответствующими области максимума стойкостной зависимости, увеличение диаметра сверла приведет к увеличению интенсивности износа ленточек. Подтверждением этого являются результаты производственных испытаний, представленные в работе автора [21] (таблица 3.2).

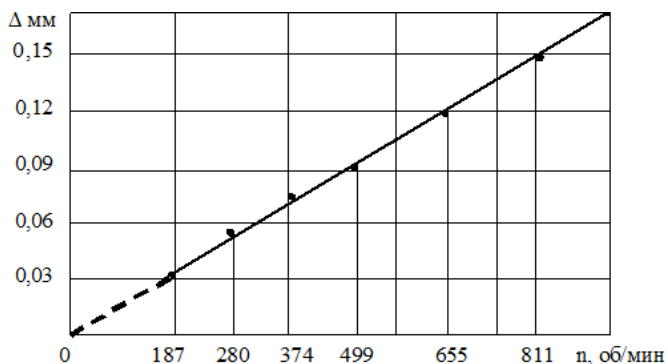


Рисунок 3.13 – Зависимость разбивки отверстия  $\Delta$  от частоты вращения шпинделя  $n$

Таблица 3.2 – Условия и результаты производственных испытаний

|                                                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Диаметр сверла $d$ , мм                                            | 9,8  | 10,5 | 11,5 | 12,0 | 13,8 | 17,5 | 21,0 | 35,0 |
| Скорость $V$ , м/мин.                                              | 13,8 | 12,6 | 12,6 | 12,0 | 12,6 | 13,8 | 13,2 | 12,0 |
| Частота вращения шпинделя станка $n$ , об./мин.                    | 448  | 381  | 348  | 318  | 290  | 251  | 200  | 106  |
| Подача $S$ , мм/об.                                                | 0,22 | 0,12 | 0,18 | 0,14 | 0,22 | 0,2  | 0,25 | 0,25 |
| Твердость деталей НВ                                               | 200  | 300  | 200  | 180  | 200  | 190  | 300  | 300  |
| Средняя наработка в метрах $\overline{L}_O$ , м                    | 47,7 | 6,0  | 32,8 | 22,9 | 39,2 | 36,0 | 6,0  | 4,0  |
| Средняя стойкость в часах $\overline{T}_O$ , ч                     | 8,0  | 2,2  | 8,7  | 8,56 | 10,2 | 13,3 | 2    | 2,4  |
| Средний износ ленточек $\overline{K}_{ЛО}$ , мм                    | 14,4 | 9,7  | 10,1 | 9,4  | 10,5 | 18,9 | 21,0 | 36,0 |
| Средняя интенсивность износа ленточек, $\overline{I}_{КЛО}$ , мм/м | 0,3  | 1,61 | 0,31 | 0,41 | 0,28 | 0,52 | 3,5  | 9,0  |

Испытывались партии сверл различных диаметров, скорость резания которых соответствовала области максимума стойкостной зависимости. Сверла эксплуатировались до полной потери работоспособности – функционального отказа по причине накопления повреждений в виде износа. Определялась средняя стойкость – средняя наработка до функционального отказа  $\overline{L}_O$  и средняя величина износа ленточек  $\overline{K}_{\text{ЛО}}$  при потере работоспособности, которые позволили получить среднюю интенсивность износа ленточек сверл различных диаметров  $\overline{I}_{\text{КЛО}}$ . Условия проведения производственных испытаний, величины средних наработок и стойкостей, и средних износов ленточек при отказе сверл представлены в таблице 3.2. Как видно в таблице 3.2, для обеспечения постоянной скорости резания с увеличением диаметра сверл приходится значительно снижать частоту вращения шпинделя станка.

В отношении интенсивности износа ленточек и стойкости, испытанные сверла следует разделить на две группы по твердости обрабатываемых деталей. В первую группу следует отнести сверла диаметром: 9,8 мм, 11,5 мм, 12,0 мм, 13,8 мм, 17,5 мм, у которых твердость обрабатываемых заготовок была в пределах 180–200 НВ. Ко второй группе следует отнести сверла диаметром: 10,5 мм, 21 мм, 35 мм, у которых твердость обрабатываемых заготовок равна 300 НВ. Как видно из представленной таблицы интенсивность износа ленточек и стойкость сверл первой и второй группы существенно отличаются.

Корреляционный анализ тесноты связи между диаметрами сверл первой группы и их средней интенсивностью износа ленточек показал тесную линейную связь между этими величинами. Коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,956, при интервале его критических значений 0,805–0,991, то есть имеет высокий уровень значимости 0,001 [40].

В виду того, что интенсивность износа ленточек зависит от разбивки обработанных отверстий, которая, в свою очередь, зависит от частоты вращения шпинделя станка, для снижения интенсивности износа ленточек при увеличении диаметра сверла

необходимо увеличивать скорость резания посредством увеличения частоты вращения шпинделя станка. Это значит, что, если бы стойкость сверл зависела только от износа ленточек, диаметр сверла оказывал бы влияние на скорость резания максимума стойкостной зависимости. Однако увеличение скорости резания выше значения максимума стойкостной зависимости приведет к резкому повышению интенсивности износа лезвий (рисунок 3.5, кривая а), и повышения стойкости сверл не произойдет. Поэтому изменение диаметра сверла не окажет влияния на скорость резания максимума стойкостной зависимости.

Для определения характера влияния диаметра сверл на их стойкость проведен корреляционный анализ тесноты связи между диаметрами сверл первой группы и их стойкостью. Корреляционный анализ показал абсолютное отсутствие связи между диаметром сверл и их средней наработкой в метрах. Коэффициент линейной корреляции Пирсона – 0,161, при интервале его критических значений 0,805–0,991 [40]. То есть при проведении производственных испытаний автором установлено, что диаметр сверл не оказывает влияния на их среднюю наработку, выраженную в общей длине просверленных отверстий [41]. Однако общепринятые формулы, отражают прямо пропорциональную зависимость между периодом стойкости и диаметром сверл [13, 18, 19, 28, 38 и др.]. График зависимости  $\overline{T_o} = f(d)$  показан на рисунке 3.14 [41].

В таблице 3.2 приведена средняя стойкость сверл, выраженная в часах  $\overline{T_o}$ . В отличие от средней наработки, выраженной в метрах, средняя стойкость имеет тенденцию к увеличению при увеличении диаметра сверла. Корреляционный анализ показал тесную связь между ними. Коэффициент линейной корреляции Пирсона 0,983 при интервале его критических значений 0,805–0,991, то есть имеет высокий уровень значимости 0,001 [40]. Близкое к единице значение коэффициента корреляции обозначает крайний случай статистической зависимости – функциональную зависимость.

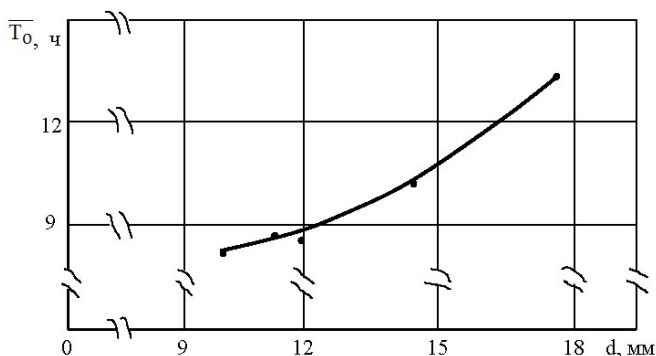


Рисунок 3.14 – Зависимость средней стойкости до функционального отказа от диаметра сверл

Эта зависимость может быть представлена в виде:

$$\overline{T_0} = 3,58d^{0,4}. \quad (3.1)$$

Фактически наработка в метрах характеризует количество изготовленных деталей, тогда как стойкость в часах характеризует время, за которое эти детали были изготовлены. Поэтому увеличение времени на изготовление деталей без увеличения их количества с ростом диаметра сверл отнюдь не является положительным фактором. Возникла необходимость определить причины и факторы, в силу которых такая закономерность имеет место.

Выше показано, что между диаметрами сверл и их средней интенсивностью износа ленточек при отказе существует тесная корреляционная связь. Средняя интенсивность износа ленточек рассчитывалась по формуле:

$$\overline{I_{\text{кло}}} = \frac{\overline{K_{\text{ло}}}}{\overline{L_0}}. \quad (3.2)$$

Из формулы (3.2) следует, что средняя интенсивность износа ленточек возрастает или при увеличении средней величины износа ленточек при отказе сверл  $\overline{K_{\text{лоср}}}$  или при уменьшении средней стойкости в метрах  $\overline{L_{\text{осрм}}}$ . Проведенный корреляционный анализ, результаты которого представлены выше, не выявил

наличия связи между средней стойкостью в метрах и диаметром сверл. Корреляционный анализ тесноты связи между диаметром сверл и средней величиной износа ленточек при их отказе показал наличие тесной связи между ними. Коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,91, при интервале его критических значений 0,621–0,928, то есть имеет высокий уровень значимости 0,001 [40]. Таким образом, средняя интенсивность износа ленточек возрастает с увеличением диаметра сверл за счет увеличения средней величины износа ленточек, а средняя наработка в метрах не зависит от диаметра сверла.

Часовая средняя стойкость связана со средней наработкой в метрах следующим образом:

$$\overline{T_o} = \frac{1000\overline{L_o}}{60S \times n} = \frac{\overline{L_o} \times \pi \times d}{60S \times V}, \quad (3.3)$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя станка.

Из представленной зависимости следует, что при отсутствии тенденции к возрастанию средней наработки метрах и относительно постоянной скорости резания и подаче часовая средняя стойкость увеличивается с увеличением диаметра сверла.

Используя зависимости (3.1) и (3.3) получим зависимость (3.4) для расчета средней наработки:

$$\overline{L_o} = \frac{68,4 \cdot S \cdot V}{d^{0,6}}. \quad (3.4)$$

В таблице 3.3 представлена рассчитанная по формуле (3.4) средняя стойкость сверл, из нее видно, что погрешность расчетов не превышает 13,1 % и в среднем составляет 6,3 %.

В работе автора [27] приведена зависимость для расчета рациональной подачи, которая для сверл диаметром большим 10 мм имеет вид:

$$S_{\text{рац.}} = 0,035d^{0,75}. \quad (3.5)$$

Используя зависимости (3.4) и (3.5) и значение скорости резания максимума стойкостной зависимости ( $V = 13,0$  м/мин.), получим формулу для расчета максимальной средней наработки [41]:

$$\overline{L_o}_{\text{max}} = 31d^{0,15}. \quad (3.6)$$

Таблица 3.3 – Расчетная средняя стойкость

| Диаметр сверла d, мм                                | 9,8  | 11,5 | 12,0 | 13,8 | 17,5 |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Средняя наработка до отказа<br>$\overline{L}_O$ , м | 47,7 | 32,8 | 22,9 | 39,2 | 36,0 |
| $\overline{L}_O$ рассчитанная по формуле (3.4), м   | 52,8 | 32,7 | 25,9 | 39,3 | 33,9 |
| Погрешность расчета в %                             | 10,7 | 0,3  | 13,1 | 0,25 | 5,8  |

Зависимость (3.6) показывает, что при работе со скоростью резания максимума стойкостной зависимости и с рациональными подачами средняя наработка в метрах возрастает с увеличением диаметра сверла. Вместе с тем, корреляционный анализ результатов производственных испытаний, представленных выше, показал отсутствие связи между диаметром сверл и их средней с наработкой. Причиной этого может быть применение заниженных подач, против рациональных (таблица 3.4), подтверждением этого может служить наработка сверл диаметром  $d = 9,8$  мм, подача которых равна оптимальной подаче  $S = S_{\text{рац}}$  (таблица 3.4) и их средняя наработка максимальная (таблица 3.3).

Таблица 3.4 – Фактическая и расчетная подачи

| Диаметр сверла d, мм                                   | 9,8  | 11,5 | 12,0 | 13,8 | 17,5 |
|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| S фактическая, мм/об.                                  | 0,22 | 0,18 | 0,14 | 0,22 | 0,2  |
| $S_{\text{рац}}$ рассчитанная по формуле (3.5), мм/об. | 0,22 | 0,25 | 0,26 | 0,29 | 0,34 |

Из вышеизложенного следует, что с увеличением диаметра при неизменной скорости резания максимума стойкостной зависимости и оптимальной подаче стойкость сверл повышается. Таким образом, с увеличением диаметра сверла изменяется количественная характеристика максимума стойкостной зависимости без изменения ее качественной характеристики. С увеличением диаметра сверл крутизна левых ветвей графиков стойкостных зависимостей будет возрастать за счет увеличения интенсивности износа ленточек, вызванной уменьшением разбивки



обрабатываемых отверстий, а стойкость сверл в диапазоне низких скоростей резания, соответственно, будет уменьшаться. Тогда, как в диапазоне скоростей резания максимума стойкостной зависимости и высоких скоростей резания, стойкость сверл будет равномерно возрастать с увеличением диаметра сверла.

Изменение диаметра сверл будет влиять на характер стойкостной зависимости так, как это показано на рисунке 3.15, на котором: 1 –  $d = 10$  мм; 2 –  $d = 15$  мм; 3 –  $d = 20$  мм; 4 –  $d = 25$  мм; 5 –  $d = 30$  мм.

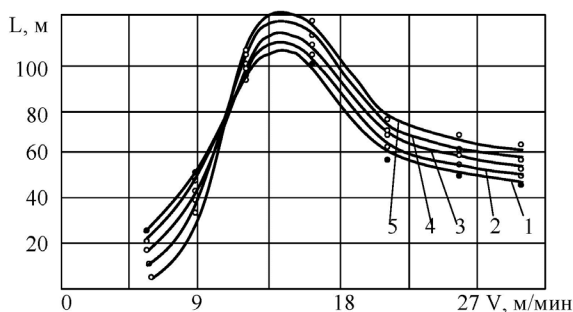


Рисунок 3.15 – Влияние диаметра на характер стойкостной зависимости

### 3.7.3. Влияние твердости материала обрабатываемых заготовок

Наибольшее влияние на температуру резания (после скорости резания) оказывают физико-механические свойства материала обрабатываемых заготовок. Чем выше предел прочности  $\sigma_b$  и твердость НВ материала обрабатываемых заготовок, тем большую силу надо приложить на его деформацию по условной плоскости сдвига при отделении стружки в процессе резания, следовательно, тем больше выделится теплоты и тем больше будет температура резания. В то же время, с увеличением прочности  $\sigma_b$  и твердости НВ материала обрабатываемых заготовок стружка соприкасается с передней поверхностью режущего лезвия

на меньшей площади, повышается давление на единицу поверхности контакта и уменьшается теплоотвод, что также приводит к увеличению температуры резания. Вместе с тем, чем выше твердость материала заготовок, тем больше его абразивная способность и меньше разбивка обрабатываемых отверстий [42].

Результаты производственных испытаний, представленные в работе [21], показывают, что твердость материала заготовок оказывает существенное влияние на наработку до функционального отказа сверл. С увеличением твердости материала обрабатываемых заготовок увеличивается интенсивность износа лезвий и ленточек сверл [42]. При повышении твердости материала обрабатываемых заготовок из-за увеличения температуры резания максимум графика зависимости интенсивности износа лезвий от скорости резания будет смещаться по оси абсцисс в сторону низких скоростей резания, а крутизна правой ветви будет расти. Максимум графика зависимости интенсивности износа ленточек от скорости резания, при этом, наоборот будет смещаться в сторону высоких скоростей резания, так как увеличение твердости материала обрабатываемых заготовок будет уменьшать разбивку обрабатываемых отверстий, а расти будет крутизна его левой ветви по этой же причине и по причине увеличения абразивной способности материала заготовок. То есть твердость материала заготовок оказывает прямо противоположное влияние на характер зависимостей интенсивности износа лезвий и ленточек сверл от скорости резания и на направление смещения их максимумов по оси абсцисс. При увеличении твердости материала обрабатываемых заготовок снижение скорости резания с целью уменьшения температуры резания для повышения работоспособности лезвий в значительной степени снизит работоспособность ленточек. А увеличение скорости с целью увеличения разбивки обрабатываемых отверстий для повышения работоспособности ленточек в значительной степени снизит работоспособность лезвий. Повышение стойкости не произойдет.

Из этого следует, что увеличение твердости материала обрабатываемых заготовок уменьшит стойкость сверл, но не изменит

скорости резания максимума стойкостной зависимости. Изменится количественная характеристика максимума без изменения ее качественной характеристики, т.е. твердость обрабатываемых заготовок будет влиять на характер стойкостной зависимости так, как это показано на рисунке 3.16, на котором: 1 – 190 НВ; 2 – 250 НВ; 3 – 300 НВ.

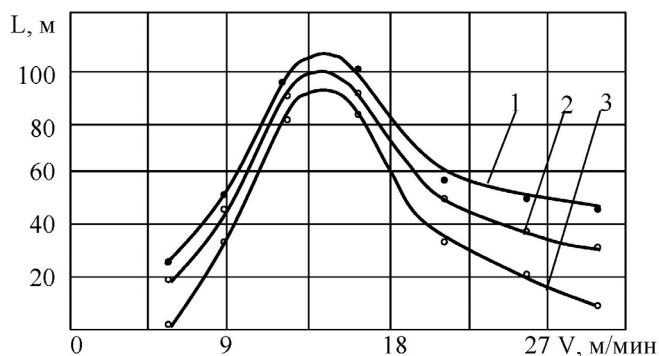


Рисунок 3.16 – Влияние твердости материала обрабатываемых заготовок на характер стойкостной зависимости

В диапазоне низких скоростей резания (левая ветвь графика стойкостной зависимости) при увеличении твердости материала обрабатываемых заготовок крутизна кривой графика будет возрастать за счет увеличения интенсивности износа ленточек по причине уменьшения разбивки обрабатываемых отверстий и увеличения абразивной способности материала обрабатываемых заготовок. В диапазоне высоких скоростей резания (правая ветвь графика стойкостной зависимости) при увеличении твердости материала обрабатываемых заготовок крутизна кривой графика будет возрастать за счет увеличения интенсивности износа лезвий по причине повышения температуры резания.

## **ГЛАВА 4. СТОЙКОСТНЫЕ МОДЕЛИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ**

### **4.1. Пути обеспечения надежности при обработке сверлением**

В работах [43, 44, 45] рассмотрены пути обеспечения надежности при обработке сверлением, наиболее существенными из которых являются:

- выбор рациональных параметров режима резания, обеспечивающих максимальную стойкость спиральных сверл;
- выбор рационального периода эксплуатации между заточками с необходимой вероятностью безотказной работы;
- полное удаление дефектов износа при заточке сверл.

Указанные пути снижения затрат приемлемы для тех типов производств, где разрабатывается технологический процесс, нормируются операции обработки заготовок и существует планово-предупредительная замена инструмента. В автоматизированном массовом производстве, где невозможен контроль рабочего за состоянием каждого инструмента, предложенные пути снижения затрат на обработку сверлением должны сочетаться с предотвращением поломок сверл в результате износа.

### **4.2. Выбор рациональных параметров режима резания**

Параметры режима резания при сверлении, в отличие от других видов обработки, включают скорость резания и подачу. Глубина резания равна половине диаметра сверла. В работе [27] рассмотрен способ выбора рациональной подачи, обеспечивающей максимальную стойкость инструмента, и предложена зависимость для ее расчета:

$$S_o = Cd^{0,75}, \text{ мм/об.}, \quad (4.1)$$

где  $C = 0,04$  для сверл диаметром 8–10 мм и  $C = 0,035$  для сверл диаметром больше 10 мм.

Для сталей 240–300 НВ, рассчитанные по формуле (4.1) подачи, следует умножать на коэффициент 0,8, для сталей > 300 НВ подачи следует умножать на коэффициент 0,6.

Скорость резания необходимо выбирать, исходя из программы выпуска конкретных изделий.

При проектировании автоматической линии, агрегатного станка, станка-автомата, а также при разработке программы для станка с ЧПУ, известна годовая программа выпуска изготавливаемых на них изделий. Исходя из этого, рассчитывается количество изделий, изготавливаемых за одну смену [46]:

$$N_{см} = N/Ч_{см},$$

где  $N$  – годовая программа выпуска изделий,  $Ч_{см}$  – число рабочих смен в году:

$$Ч_{см} = C \times \Phi,$$

где  $C$  – число смен в сутки,  $\Phi$  – число рабочих дней в году:

$$\Phi = 365 - (B + П),$$

где 365 – число дней в году,  $B$  – число выходных дней,  $П$  – число праздничных дней.

По количеству изделий, изготавливаемых за одну смену, рассчитывается суммарная глубина отверстий, просверленных одним сверлом за одну смену:

$$L_{см} = l_o N_{см},$$

где  $l_o$  – глубина сверления.

Суммарное время на сверление этих отверстий рассчитывается следующим образом:

$$\Sigma T_{св} = [T_{см} - (\Sigma t_{np} + \Sigma t_{no})] K_p,$$

где  $T_{см}$  – продолжительность одной смены, в часах без обеденного перерыва,  $\Sigma t_{np}$  – суммарное время на подачу заготовок в позицию обработки,  $\Sigma t_{no}$  – суммарное время на подвод, перебег и отвод инструмента,  $K_p$  – коэффициент ( $K_p < 1$ ), учитывающий простой оборудования в течение рабочей смены в связи с текущим ремонтом и техническим обслуживанием,

для автоматических линий, агрегатных станков и станков автоматов  $K_p = 0,9$ .

Для управляющей программы при обработке деталей на станках с ЧПУ  $\Sigma T_{св}$  рассчитывается следующим образом:

$$\Sigma T_{св} = [T_{см} - (\Sigma t_{ум} + \Sigma t_{но})] K_p,$$

где  $\Sigma t_{ум}$  – суммарное штучное время на выполнение всех переходов обработки заготовок, кроме сверления.

$$K_p = 0,97 \text{ – для станков с ЧПУ.}$$

После расчета суммарного времени сверления отверстий определяется частота вращения шпинделя станка из равенства:

$$L_{см}/S \times n = \Sigma T_{св},$$

где  $S$  – подача на оборот сверла,  $n$  – частота вращения шпинделя станка, тогда

$$n = \frac{L_{см}}{S \cdot \Sigma T_{св}}, \text{ об./мин.} \quad (4.2)$$

При наличии частоты вращения шпинделя можно вычислить скорость резания по известной формуле

$$V = \frac{\pi d n}{1000}, \text{ м/мин.} \quad (4.3)$$

Поставив (4.2) в (4.3), получим зависимость для расчета скорости резания:

$$V = \frac{\pi d L_{см}}{1000 \cdot S \cdot \Sigma T_{св}}, \text{ м/мин.}, \quad (4.4)$$

где  $d$  – диаметр сверла.

При расчетной скорости резания, меньшей скорости максимума зависимости наработки от скорости резания, ее необходимо увеличить до значения скорости максимума, равной 13,1 м/мин.

### 4.3. Выбор рационального периода эксплуатации между заточками

Известно, что связь скорости резания со стойкостью может быть выражена немонотонной экстремальной кривой с одним или двумя перегибами.

На рисунке 4.1 представлены зависимости стойкости и наработки от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл

диаметром  $d = 10,2$  мм в широком диапазоне ее варьирования [24]. Сверлились сквозные отверстия глубиной  $3d$  с подачей  $0,23$  мм/об. в заготовках из стали 45 190 НВ сверлами из быстрорежущей стали Р6М5 с поливом СОЖ – 5 % раствор эмульсола «Укринол 1». Сверла эксплуатировались до функционального отказа – поломки в результате износа.

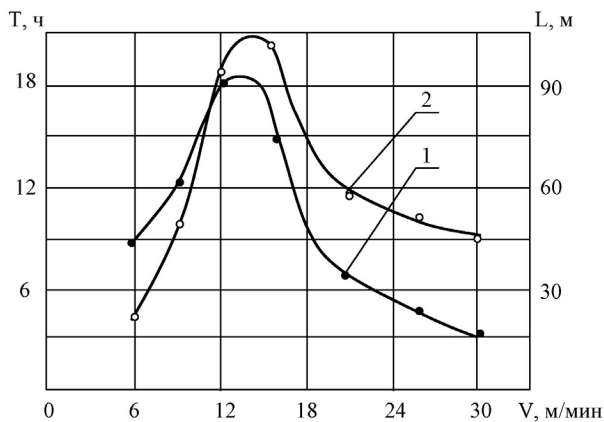


Рисунок 4.1 – Зависимость стойкости  $T$  и наработки  $L$  от скорости резания, где 1 – стойкость в час, 2 – наработка в метрах (суммарная глубина просверленных отверстий)

Скорости резания максимумов графиков в представленных зависимостях близки по значению, однако они различаются крутизной левых и правых ветвей, что дает разную точность математических моделей, полученных посредством их аппроксимации. Практический интерес представляют области максимумов зависимостей и правые нисходящие ветви. Скорости резания максимумов повсеместно используются в автоматизированном массовом производстве при обработке заготовок на автоматических линиях, агрегатных станках, станках-автоматах [2], более высокие скорости резания используются на универсальных вертикально – и радиально-сверлильных станках в единичном, серийном и крупносерийном производствах [47].

Для аппроксимации областей максимумов (вершин горбов) кривых графиков, представленных на рисунке 4.1, авторами работ [18, 48] предложены зависимости вида:

$$T = aV^b e^{-CV}, \quad (4.5)$$

$$T = T_{.m} \left( V^a e^{-V^b} \right)^n, \quad (4.6)$$

где  $T_{.m}$  – стойкость максимума,  $a - \text{const}$ ,  $b, C, n$  – показатели степени.

Последние в (4.5) находятся решением системы логарифмических уравнений с координатами  $T_1$  и  $V_1$ ,  $T_2$  и  $V_2$  и  $T_3$  и  $V_3$  в произвольно выбранных точках на аппроксимируемой кривой. В результате решения этих уравнений получены формулы для расчета показателей степени в виде:

$$b = \frac{(V_2 - V_1)(\ln T_3 - \ln T_1) + (V_1 - V_3)(\ln T_2 - \ln T_1)}{(\ln V_2 - \ln V_1)(V_1 - V_3) + (V_2 - V_1)(\ln V_3 - \ln V_1)},$$

$$C = \frac{b(\ln V_2 - \ln V_1) - (\ln T_2 - \ln T_1)}{(V_2 - V_1)}.$$

Константу находим, решая логарифмическое уравнение:

$$\ln a = \ln T_{.m} - b \ln V_{.m} + CV_{.m}.$$

Показатели степени  $a$  и  $b$  зависимости (3.6) находятся из уравнений:

$$b = \frac{1}{\ln V_{.m}}, a = \frac{e}{\ln V_{.m}},$$

где  $V_{.m}$  – скорость резания максимума.

Для определения показателя степени  $n$  находятся значения

$$n_i = \frac{\ln \frac{T_i}{T_{.m}}}{\ln \left( V_i^a e^{-V_i^b} \right)},$$

для всех точек, кроме  $T_{.m}$  и  $V_{.m}$ , а затем найденные значения усредняются.

После определения показателя степени  $n$  значение  $T_{.m}$  уточняется. Для этого рассчитываются значения  $T_{.m_i}$  по формуле:

$$T_{.m_i} = \frac{T_i}{\left( V_i^b e^{V_i^c} \right)^n},$$



а затем найденные значения  $T_{m_i}$  усредняются.

В результате аппроксимации кривой 1 на рисунке 3.1 получены следующие математические выражения:

$$T = 1,42 \times 10^{-4} V^{7,6} e^{-0,595V}, \quad (4.7)$$

$$T = 18,4 \left( V^{1,06} e^{-V^{0,39}} \right)^{16,522}. \quad (4.8)$$

В таблице 4.1 представлены фактические и расчетные по зависимостям (4.7) и (4.8) значения стойкости и погрешности расчетов.

Таблица 4.1 – Фактические и расчетные  
по формулам значения стойкости и погрешности расчетов

|                                                     |        |       |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|
| Скорость резания V, м/мин.                          | 12     | 16    |
| Стойкость T <sub>факт.</sub> , ч.                   | 18     | 15    |
| Стойкость T <sub>расч.</sub> , ч., по формуле (4.7) | 17,91  | 14,76 |
| Погрешность расчетов, %                             | 0,5 %  | 1,6 % |
| Стойкость T <sub>расч.</sub> , ч., по формуле (4.8) | 17,92  | 15,7  |
| Погрешность расчетов, %                             | 0,44 % | 4,6 % |

Как видно из таблицы 4.1, меньшую погрешность расчетов дает зависимость (4.7), средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 1,05 %, при максимальном значении 1,6 %, тогда как средняя погрешность расчетов по зависимости (4.8) составила 2,52 % при максимальном значении 4,6 %.

В результате аппроксимации кривой 2 на рисунке 4.1 получены следующие математические выражения:

$$L = 3,08 \times 10^{-6} V^{10,38} e^{-0,7158V}, \quad (4.9)$$

$$L = 107 \left( V^{1,03} e^{-V^{0,38}} \right)^{10,1}. \quad (4.10)$$

В таблице 4.2 представлены расчетные по данным зависимостям значения наработки и погрешность расчетов.

Как видно из таблицы 4.2, меньшую погрешность расчетов дает зависимость (4.9), средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 1,52 %, при максимальном значении 1,92 %, тогда как средняя погрешность расчетов по зависимости (4.10) составила 4,8 % при максимальном значении 7,2 %.

Таблица 4.2 – Фактические и расчетные  
по формулам значения наработки и погрешности расчетов

|                                                     |       |        |
|-----------------------------------------------------|-------|--------|
| Скорость резания $V$ , м/мин.                       | 12    | 16     |
| Наработка $L_{\text{факт.}}$ , м                    | 93    | 102    |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.9)  | 91,21 | 103,14 |
| Погрешность расчетов, %                             | 1,92  | 1,12   |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.10) | 95,3  | 94,65  |
| Погрешность расчетов, %                             | 2,41  | 7,2    |

По итогам вышеприведенного анализа следует выбрать зависимости (4.7) и (4.9) вида

$$T = aV^b e^{-CV},$$

как более точно описывающие область максимума стойкостных зависимостей. При этом средняя погрешность расчетов по зависимости стойкости от скорости резания (4.7) составила 1,05 %, а погрешность расчетов по зависимости наработки от скорости резания (4.9) составила 1,52 %, т.е. на 0,47 % больше, что само по себе несущественно.

В работе [18] приведена формула для расчета скорости резания максимума стойкостной зависимости:

$$V_m = b/C, \text{ м/мин.}$$

По зависимости стойкости от скорости резания (4.7) скорость резания максимума составила:

$$V_m = 12,77 \text{ м/мин.}$$

По зависимости наработки от скорости резания (4.9) скорость резания максимума составила:

$$V_m = 14,5 \text{ м/мин.},$$

то есть скорость резания максимума по зависимости наработки от скорости резания (рисунок 4.1, кривая 2) на 13,55 % выше скорости резания максимума по зависимости стойкости от скорости резания (рисунок 4.1, кривая 1). Отсюда следует, что более предпочтительной для аппроксимации области максимума является формула (4.9), описывающая зависимость наработки от скорости резания (рисунок 4.1, кривая 2), т.к. наработка фактически

отражает количество изготовленных заготовок, и максимальное их количество будет получено при большей скорости резания, а значит и при большей производительности.

Для аппроксимации правых, ниспадающих ветвей кривых графиков, представленных на рисунке 4.1, авторами работы [18] предложены степенная и экспоненциальная зависимости вида:

$$T = aV^b, \quad (4.11)$$

$$T = ae^{-CV}. \quad (4.12)$$

Аппроксимация правых ветвей графиков рисунка 4.1 степенной и экспоненциальной зависимостями не привела к положительному результату. Получены зависимости в виде:

$$T = 1221,3 V^{-1,656}, \quad (4.13)$$

$$T = 52,28 e^{-0,088V}, \quad (4.14)$$

$$L = 3517,83 V^{-1,28}, \quad (4.15)$$

$$L = 261,87 e^{-0,06V}. \quad (4.16)$$

В таблице 4.3 представлены фактические и расчетные по данным зависимостям (4.13–4.16) значения стойкости и наработки и погрешность расчетов.

Таблица 4.3 – Фактические и расчетные по формулам значения стойкости и наработки и погрешности расчетов

| Скорость резания V, м/мин.                           | 16     | 21    | 26    | 30    |
|------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Стойкость T <sub>факт.</sub> , ч.                    | 15     | 6,2   | 5,4   | 4     |
| Стойкость T <sub>расч.</sub> , ч., по формуле (4.13) | 12,28  | 7,9   | 5,54  | 4,37  |
| Погрешность расчетов, %                              | 17,4   | 27,4  | 0,72  | 9,25  |
| Стойкость T <sub>расч.</sub> , ч., по формуле (4.14) | 12,79  | 8,24  | 5,31  | 3,73  |
| Погрешность расчетов, %                              | 14,7   | 32,9  | 3,45  | 6,75  |
| Наработка L <sub>факт.</sub> , м                     | 102    | 58    | 51    | 45    |
| Наработка L <sub>расч.</sub> , м, по формуле (4.15)  | 101,16 | 71,42 | 54,34 | 45,24 |
| Погрешность расчетов, %                              | 0,82   | 23,14 | 6,55  | 0,53  |
| Наработка L <sub>расч.</sub> , м, по формуле (4.16)  | 100,27 | 74,3  | 55,03 | 43,28 |
| Погрешность расчетов, %                              | 1,7    | 28,1  | 7,9   | 3,81  |

Как видно из представленной таблицы, все зависимости дают большую погрешность в расчетах стойкости и наработки при скорости резания 21 м/мин. Такая большая погрешность может быть результатом наличия точки перегиба при данной скорости резания.

Скорость резания точки перегиба является либо максимальной скоростью при аппроксимации верхней части правых ветвей графиков рисунка 4.1, либо минимальной скоростью при аппроксимации их нижних частей, поэтому проводился анализ двух зависимостей каждого вида для верхних частей и двух – для нижних.

$$T = 130211 V^{3,265}, \quad (4.17)$$

$$T = 255 e^{-0,176V}, \quad (4.18)$$

$$T = 213 V^{1,15}, \quad (4.19)$$

$$T = 17,36 e^{-0,047V}, \quad (4.20)$$

$$L = 31728,8 V^{2,074}, \quad (4.21)$$

$$L = 622,04 e^{-0,113V}, \quad (4.22)$$

$$L = 488,24 V^{0,7}, \quad (4.23)$$

$$L = 104,38 e^{-0,028V}. \quad (4.24)$$

В таблице 4.4 представлены фактические и расчетные по данным зависимостям значения стойкости верхней (4.17–4.20) и нижней (4.21–4.24) частей правой ветви графика рисунка 4.1, кривая 1 и погрешность расчетов.

Как видно из представленной таблицы, для верхней части правой ветви графика 1 на рисунке 4.1 большую точность расчетов дает степенная зависимость (4.17). Средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 1,45 %, при максимальном значении 1,7 %. Средняя погрешность расчетов по зависимости (4.18) составила 1,9 %, при максимальном значении 2,1 %.

Для нижней части правой ветви кривой 1 графика на рисунке 4.1 большую точность расчетов дает экспоненциальная зависимость (4.20). Средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 5 %, при максимальном значении 5,6 %.

Таблица 4.4 – Фактические и расчетные значения стойкости верхней и нижней частей правой ветви и погрешности расчетов

|                                                      |       |      |      |      |
|------------------------------------------------------|-------|------|------|------|
| Скорость резания $V$ , м/мин.                        | 16    | 21   | 26   | 30   |
| Стойкость $T_{\text{факт.}}$ , ч.                    | 15    | 6,2  | 5,4  | 4    |
| Стойкость $T_{\text{расч.}}$ , ч., по формуле (4.17) | 15,25 | 6,27 |      |      |
| Погрешность расчетов, %                              | 1,7   | 1,2  |      |      |
| Стойкость $T_{\text{расч.}}$ , ч., по формуле (4.18) | 15,26 | 6,33 |      |      |
| Погрешность расчетов, %                              | 1,7   | 2,1  |      |      |
| Стойкость $T_{\text{расч.}}$ , ч., по формуле (4.19) |       | 6,42 | 5,03 | 4,26 |
| Погрешность расчетов, %                              |       | 3,6  | 6,9  | 6,57 |
| Стойкость $T_{\text{расч.}}$ , ч., по формуле (4.20) |       | 6,45 | 5,1  | 4,22 |
| Погрешность расчетов, %                              |       | 3,9  | 5,6  | 5,6  |

Средняя погрешность расчетов по зависимости (4.19) составила 5,7 % при максимальном значении 6,9 %.

В таблице 4.5 представлены фактические и расчетные по данным зависимостям значения наработки верхней и нижней частей правой ветви 2 графика на рисунке 4.1 и погрешность расчетов.

Таблица 4.5 – Фактические и расчетные значения наработки верхней и нижней частей правой ветви и погрешности расчетов

|                                                     |        |       |       |       |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Скорость резания $V$ , м/мин.                       | 16,0   | 21,0  | 26,0  | 30,0  |
| Наработка $L_{\text{факт.}}$ , м                    | 102    | 58    | 51    | 45    |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.21) | 100,95 | 57,43 |       |       |
| Погрешность расчетов, %                             | 1,0    | 0,98  |       |       |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.22) | 102,00 | 57,97 |       |       |
| Погрешность расчетов, %                             | 0      | 0,052 |       |       |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.23) |        | 57,95 | 49,91 | 45,15 |
| Погрешность расчетов, %                             |        | 0,09  | 2,14  | 0,33  |
| Наработка $L_{\text{расч.}}$ , м, по формуле (4.24) |        | 57,98 | 50,4  | 45,06 |
| Погрешность расчетов, %                             |        | 0,035 | 1,18  | 0,13  |

Как видно из представленной таблицы, для верхней части правой ветви графика 2 на рисунке 4.1 большую точность расчетов дает экспоненциальная зависимость (3.22). Средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 0,026 % при максимальном значении 0,052 %. Средняя погрешность расчетов по зависимости (4.21) составила 0,99 % при максимальном значении 1 %.

Для нижней части правой ветви кривой 2 графика на рисунке 4.1 большую точность расчетов также дает экспоненциальная зависимость (4.24). Средняя погрешность расчетов по данной зависимости составила 0,448 %, при максимальном значении 1,18 %. Тогда как средняя погрешность расчетов по зависимости (4.23) составила 0,85 % при максимальном значении 2,14 %.

Для верхних частей графиков 1 и 2 на рисунке 4.1 минимальная погрешность расчетов получена для зависимости наработки от скорости резания (кривая 2) при ее аппроксимации экспоненциальной зависимостью. Для нижних частей графиков 1 и 2 на рисунке 4.1 минимальная погрешность расчетов получена также для зависимости наработки от скорости резания (кривая 2) при ее аппроксимации экспоненциальной зависимостью.

На основании вышепредставленного анализа более предпочтительной для использования представляется зависимость наработки от скорости резания (кривая 2) при аппроксимации ее области максимума зависимостью (4.9): верхней части правой ветви – зависимостью (4.22), и нижней части правой ветви – зависимостью (4.24):

$$L = 3,08 \times 10^{-6} V^{10,38} e^{-0,7158V}, \quad (4.9)$$

$$L = 622,04 e^{-0,113V}, \quad (4.22)$$

$$L = 104,38 e^{-0,028V}. \quad (4.24)$$

Математическая модель получена аппроксимацией результатов лабораторных исследований при проведении однофакторного эксперимента. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла специально изготавливались из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии и отбирались

по идентичности геометрических параметров. Обрабатывались заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2Р135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка контролировались осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, влияние случайных факторов на процесс обработки было полностью исключено. Поэтому стойкость сверл, представленная на рисунке 3.1, является максимально допустимой стойкостью для сверл данного диаметра.

В производственных условиях влияние случайных факторов процесса обработки определяет случайный характер процессов изнашивания конструктивных элементов сверл, в результате чего имеет место существенное рассеивание стойкости. Анализ результатов производственных испытаний, представленный в работе [21], показывает, что во всех случаях распределения износостойкости сверл являются нормальными и согласуются с законом нормального распределения Гаусса. При нормальном распределении коэффициент вариации не может превышать значения 0,33. В работе [49] показано, что такой коэффициент вариации имеет распределение стойкости сверл диаметром 9,8 мм, средняя наработка которых равна 47,7. Скорость резания этих сверл составляла 13,8 м/мин., подача – 0,22 мм/об., т.е. подача соответствовала подаче сверл диаметром 10,2 мм при лабораторных испытаниях. При данной скорости резания рассчитанная по зависимости (4.9), наработка равна 107,28 м. Если принять ее как максимально допустимую для наработки сверл диаметром 9,8 мм при коэффициенте вариации 0,33, то средняя наработка будет равна 53,1 м, что практически соответствует результатам производственных испытаний [21].

На основании экспериментального анализа, зависимости (4.7), (4.20) и (4.22) можно использовать для расчета средней наработки спиральных сверл до их функционального отказа в следующем виде:

$$\bar{L} = 1,52 \times 10^{-6} V^{10,38} e^{-0,7158V}, \quad (4.25)$$

$$\bar{L} = 307,91 e^{-0,113V}, \quad (4.26)$$

$$\bar{L} = 51,67e^{-0,028V}. \quad (4.27)$$

В работе [41] представлена зависимость средней наработки до функционального отказа спиральных сверл от диаметра, полученная в результате производственных испытаний:

$$\bar{T} = 3,58d^{0,4}, \text{ час.} \quad (4.28)$$

Полученная в результате производственных испытаний [41] зависимость средней стойкости от диаметра спиральных сверл после математических преобразований имеет вид:

$$\bar{L} = 37d^{0,15}, \text{ м.} \quad (4.29)$$

Скорости резания, при которых проводились производственные испытания, соответствовали области скоростей резания максимума стойкостной зависимости [21]. При этом показатель степени при диаметре в зависимости (4.28) совпадает с показателем степени, рекомендованном справочником технолога-машиностроителя [19] для сверления углеродистых конструкционных сталей быстрорежущими спиральными сверлами для скоростей резания больших точки перегиба стойкостной зависимости [18]. Подставляя зависимость (4.28) в зависимости (4.25) – (4.27), получим формулы для расчета средней наработки:

$$\bar{L} = 1,07 \times 10^{-6} V^{10,38} e^{-0,7158V} d^{0,15}, \quad (4.30)$$

$$\bar{L} = 217,34 e^{-0,113V} d^{0,15}, \quad (4.31)$$

$$\bar{L} = 36,47 e^{-0,028V} d^{0,15}. \quad (4.32)$$

В работе [20] показано, что коэффициенты вариации наработок до отказа сверл всех испытанных диаметров не зависят от условий обработки, то есть плотность распределения наработок до отказа не имеет значимой связи с параметрами режима резания, диаметром сверл, твердостью материала обрабатываемых заготовок и т.п. Это позволяет использовать максимальную величину коэффициента вариации для учета степени рассеивания наработок сверл различных диаметров и при различных условиях их эксплуатации. Использование максимальной величины



коэффициента вариации при расчете наработки с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 95\%$  гарантирует безотказную работу сверл всех диаметров. Нарботку до отказа с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 95\%$  можно определить следующим образом:

$$L_{0,95} = \bar{L} (1 - 2 \times 0,33) = 0,34 \bar{L}. \quad (4.33)$$

На основании (4.30) – (4.33) математическая модель для расчета наработки до отказа с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 95\%$  имеет вид:

$$L_{0,95} = 3,64 \times 10^{-7} V^{10,38} e^{-0,7158V} d^{0,15}, \quad (4.34)$$

$$L_{0,95} = 73,9 e^{-0,113V} d^{0,15}, \quad (4.35)$$

$$L_{0,95} = 12,4 e^{-0,028V} d^{0,15}. \quad (4.36)$$

Планово-предупредительную замену сверл целесообразно производить во время пересмен, поэтому наработка, рассчитанная по формулам (4.34) – (4.36), должна быть уменьшена до величины равной или кратной  $L_{см}$ . Например,  $L_{см}$  для отверстий диаметром 9,8 мм составляет 7,56 м, а  $L_{0,95} = 17,9$  м, значит, фактическая величина наработки сверл между заточками равна 15,12 м.

#### 4.4. Полное устранение дефектов износа при заточке сверл

В работе [21] представлена зависимость среднего износа ленточек при отказе сверл от их диаметров (рисунок 4.2), полученная при проведении производственных испытаний сверл.

Методом наименьших квадратов [95] получены три уравнения регрессии:

$$\overline{K_{ЛО}} = 0,971d, \quad (4.37)$$

$$\overline{K_{ЛО}} = 0,95d^{1,01}, \quad (4.38)$$

$$\overline{K_{ЛО}} = 6,2e^{0,052d}. \quad (4.39)$$

В работе [40] представлен метод оценки силы связи уравнений регрессии с экспериментальными данными применением

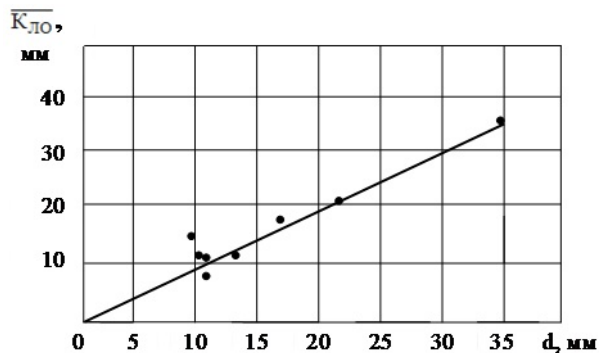


Рисунок 4.2 – Зависимость среднего износа ленточек при отказе сверл от их диаметров

выборочного коэффициента корреляции к найденным значениям коэффициентов регрессии. В таблице 4.6 показаны коэффициенты корреляции, рассчитанные предложенным методом, и средняя погрешность расчетов по каждой из полученных зависимостей.

Таблица 4.6 – Коэффициенты корреляции и погрешность расчетов

| Зависимость        | Коэффициент корреляции $r$ | Средняя погрешность расчетов в % |
|--------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Зависимость (4.37) | 0,9                        | 14,68                            |
| Зависимость (4.38) | 0,9                        | 14,79                            |
| Зависимость (4.39) | 0,91                       | 18,42                            |

Очевидно, что три последних уравнения имеют достаточно высокий коэффициент корреляции, но наименьшая погрешность расчетов получена при использовании формулы (4.37).

В работе [49], на основании анализа лабораторных исследований износа сверл диаметром 10,2 мм, приведены величины износа их лезвий и ленточек до функционального отказа. Графики зависимостей этих параметров от скорости резания показаны на рисунке 4.3.

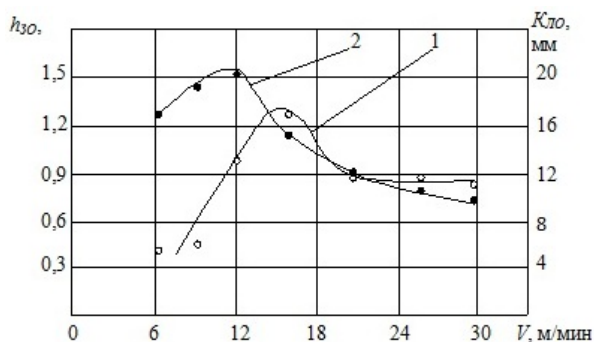


Рисунок 4.3 – Зависимости величин износа до функционального отказа сверл диаметром 10,2 мм от скорости резания, где 1 – износ лезвий, 2 – износ ленточек

На рисунке 4.3 видно, что обе зависимости имеют горбообразный вид с точкой максимума. При этом их точки максимума не совпадают, скорость максимума зависимости износа ленточек  $K_{ло}$  от скорости резания более низкая и соответствует 12 м/мин., что подтверждает превалирующее влияние износа ленточек при эксплуатации сверл в диапазоне низких скоростей резания (до 12 м/мин.).

В диапазоне высоких скоростей резания (21 м/мин. и выше) износ лезвий  $h_{30}$  до функционального отказа сверл не зависит от скорости резания, что не противоречит существующим нормативам [29], согласно которым критерий износа сверл зависит только от их диаметра, и не зависит от прочих условий обработки. Практический интерес представляет правая ниспадающая ветвь графика (рисунок 4.3) зависимости износа ленточек до функционального отказа сверл от скорости резания.

Посредством аппроксимации зависимости износа ленточек до функционального отказа сверл от скорости резания получены уравнения:

$$K_{ло} = 240,1 V^{-1}, \quad (4.40)$$

$$K_{ло} = 88,7 V^{-0,642}, \quad (4.41)$$

$$K_{ло} = 23,855 e^{-0,029V}, \quad (4.42)$$

(4.40) описывает кривую графика 2, (рисунок 4.3) в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин., (4.41) и (4.42) – 16–30 м/мин.

В таблице 4.7 представлены фактические и расчетные по формулам (4.40), (4.41) и (4.42) величины износа ленточек до функционального отказа сверл и погрешности расчетов.

Таблица 4.7 – Фактические и расчетные по формулам (4.40), (4.41) и (4.42) величины износа ленточек до функционального отказа сверл и погрешности расчетов

| Скорость резания V, м/мин.                         | 12,0  | 16,0  | 21,0  | 26,0  | 30,0  |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Износ $K_{\text{ло}}$ факт., мм                    | 20    | 15    | 13    | 11    | 10    |
| Износ $K_{\text{ло}}$ расч., м, по формуле (4.40)  | 20,00 | 15,00 |       |       |       |
| Погрешность расчетов, %                            | 0     | 0     |       |       |       |
| Износ $K_{\text{ло}}$ расч., мм, по формуле (4.41) |       | 14,96 | 12,56 | 10,95 | 9,99  |
| Погрешность расчетов, %                            |       | 0,27  | 3,37  | 0,43  | 11,22 |
| Износ $K_{\text{ло}}$ расч., м, по формуле (4.34)  |       | 14,99 | 12,97 | 11,55 | 9,99  |
| Погрешность расчетов, %                            |       | 0,005 | 0,2   | 4,76  | 0,1   |

Анализ данных таблицы 4.7 показывает, что для описания правой ветви графика 2 (рисунок 4.3) следует выбрать зависимости (4.40) и (4.42). Средняя погрешность расчетов по формуле (4.40) составила 0 %. Средняя погрешность расчетов по формуле (4.42) составила 0,56 %, а по формуле (4.41) – 1,04 %.

Используя формулы (4.40), (4.42) и (4.37), получим зависимости:

$$\overline{K_{\text{ло}}} = 12,73dV^{-1}, \quad (4.43)$$

$$\overline{K_{\text{ло}}} = 1,17de^{-0,029V}. \quad (4.44)$$

По (4.43) рассчитывается средний износ ленточек до функционального отказа сверл в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин., по (4.44) – в диапазоне скоростей резания 16–30 м/мин.

В таблице 4.8 приведены результаты расчета среднего износа ленточек до функционального отказа сверл по зависимости (3.43) и погрешности расчетов. Как видно из таблицы 4.8, скорости резания в производственных условиях в основном не выходят за пределы диапазона скоростей резания 12–14 м/мин.

**Таблица 4.8 – Фактические и расчетные по формуле (4.43)  
средние величины износа ленточек при отказе сверл  
и погрешности расчетов**

|                                               |       |       |       |      |      |       |      |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|
| Диаметр сверла<br>d, мм                       | 9,8   | 10,5  | 11,5  | 12,0 | 13,8 | 17,5  | 21,0 | 35,0  |
| V, м/мин.                                     | 13,8  | 12,6  | 12,6  | 12,0 | 12,6 | 13,8  | 13,2 | 11,4  |
| Износ $\overline{K_{\text{ЛО}}}$<br>факт., мм | 14,4  | 9,7   | 10,1  | 9,4  | 10,5 | 18,9  | 21,0 | 36,0  |
| Износ $\overline{K_{\text{ЛО}}}$ расч.,<br>мм | 20,28 | 11,64 | 11,07 | 9,4  | 9,58 | 14,9  | 13,2 | 11,78 |
| Погр. расчетов, %                             | 37,2  | 5,83  | 9,82  | 26,2 | 24   | 14,58 | 3,56 | 7,69  |

Средняя погрешность расчетов составила 16,11 %.

Износ ленточек с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$  можно рассчитать по формуле:

$$K_{\text{Л}\gamma 0,95} = 0,34 \overline{K_{\text{ЛО}}},$$

тогда зависимости (4.43) и (4.44) примут вид:

$$\overline{K_{\text{ЛО}}} = 4,33 d V^{-1}, \quad (4.45)$$

$$K_{\text{ЛО}} = 0,4 d e^{-0,029 V}. \quad (4.46)$$

Зависимость (4.45) предназначена для расчета износа ленточек с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$  в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин., а зависимость (4.46) – для диапазона скоростей резания 16–30 м/мин.

#### **4.5. Нормативные таблицы наработки и износа быстрорежущих спиральных сверл**

Используя вышеприведенную зависимость (4.1), получены подачи, представленные в таблице 4.9.

Используя зависимости (4.43), (4.44) и ранее полученные (4.34–4.36) получим нормативные таблицы (таблицы 4.10, 4.11) наработки и износа спиральных сверл с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$ , обеспечивающие безотказную работу сверл и полное удаление дефектов износа при заточках.

Таблица 4.9 – Поддачи быстрорежущих спиральных сверл

| Диаметр, мм   |      |      |      |      |     |      |      |      |     |      |      |     |      |
|---------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 8             | 10   | 12   | 14   | 16   | 18  | 20   | 22   | 24   | 26  | 28   | 30   | 35  | 40   |
| Подача, мм/об |      |      |      |      |     |      |      |      |     |      |      |     |      |
| 0,2           | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,28 | 0,3 | 0,33 | 0,35 | 0,38 | 0,4 | 0,42 | 0,45 | 0,5 | 0,55 |

Таблица 4.10 – Нарботка с вероятностью безотказной работы 95%

| d, мм | V, м/мин.                     |       |       |       |       |       |       |       |      |
|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|       | 12                            | 14    | 16    | 18    | 20    | 21    | 23    | 26    | 30   |
|       | Нарботка, L <sub>0,95</sub> м |       |       |       |       |       |       |       |      |
| 10    | 15,26                         | 18,02 | 17,22 | 13,66 | 10,89 | 9,73  | 9,2   | 8,46  | 7,56 |
| 12    | 15,65                         | 18,52 | 17,7  | 14,03 | 11,2  | 10,0  | 9,45  | 8,69  | 7,77 |
| 14    | 16,01                         | 18,95 | 18,11 | 14,36 | 11,46 | 10,23 | 9,68  | 8,9   | 7,95 |
| 16    | 16,34                         | 19,34 | 18,48 | 14,65 | 11,69 | 10,44 | 9,87  | 9,08  | 8,11 |
| 18    | 16,63                         | 19,68 | 18,81 | 14,91 | 11,9  | 10,63 | 10,05 | 9,24  | 8,26 |
| 20    | 16,9                          | 19,99 | 19,01 | 15,15 | 12,09 | 10,79 | 10,21 | 9,38  | 8,39 |
| 22    | 17,14                         | 20,28 | 19,38 | 15,37 | 12,26 | 10,95 | 10,35 | 9,52  | 8,51 |
| 24    | 17,36                         | 20,55 | 19,63 | 15,57 | 12,42 | 11,1  | 10,5  | 9,64  | 8,62 |
| 26    | 17,57                         | 20,8  | 19,87 | 15,76 | 12,57 | 11,23 | 10,62 | 9,76  | 8,73 |
| 28    | 17,77                         | 21,03 | 20,09 | 15,94 | 12,71 | 11,35 | 10,74 | 9,87  | 8,82 |
| 30    | 17,95                         | 21,25 | 20,3  | 16,1  | 12,84 | 11,47 | 10,85 | 9,97  | 8,92 |
| 32    | 18,13                         | 21,46 | 20,5  | 16,26 | 12,97 | 11,58 | 10,95 | 10,07 | 9,0  |
| 34    | 18,29                         | 21,65 | 20,69 | 16,41 | 13,09 | 11,69 | 11,05 | 10,16 | 9,09 |
| 36    | 18,45                         | 21,84 | 20,87 | 16,55 | 13,2  | 11,79 | 11,15 | 10,25 | 9,16 |
| 38    | 18,6                          | 22,02 | 21,04 | 16,68 | 13,31 | 11,89 | 11,24 | 10,33 | 9,24 |
| 40    | 18,75                         | 22,19 | 21,2  | 16,81 | 13,41 | 11,98 | 11,33 | 10,41 | 9,31 |

В случае необходимости сокращения периода эксплуатации сверл между заточками для расчета средней интенсивности изнашивания быстрорежущих спиральных сверл предлагаются формулы:

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 3,5 \times 10^{-11,38} V^{0,7158V} d^{0,85}, \quad (4.47)$$

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 0,016 e^{0,084V} d^{0,85}, \quad (4.48)$$

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 0,098 e^{-0,001V} d^{0,85}, \quad (4.49)$$

**Таблица 4.11 – Износ ленточек  
с вероятностью безотказной работы 95 %**

| d, мм | V, м/мин.                               |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-------|-----------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|       | 12                                      | 14    | 16    | 18   | 20   | 21   | 23   | 26   | 30   |
|       | Износ ленточек $K_{\text{Лг0,95}}$ , мм |       |       |      |      |      |      |      |      |
| 10    | 3,6                                     | 3,1   | 2,7   | 2,4  | 2,2  | 2,17 | 2,05 | 1,88 | 1,68 |
| 12    | 4,33                                    | 2,7   | 3,25  | 2,83 | 2,67 | 2,61 | 2,46 | 2,26 | 2,01 |
| 14    | 5,05                                    | 4,32  | 3,8   | 3,3  | 3,12 | 3,05 | 2,87 | 2,63 | 2,35 |
| 16    | 5,77                                    | 4,95  | 4,33  | 3,77 | 3,56 | 3,48 | 3,28 | 3,01 | 2,68 |
| 18    | 6,5                                     | 5,56  | 4,87  | 4,24 | 4,0  | 3,92 | 3,7  | 3,39 | 3,02 |
| 20    | 7,2                                     | 6,18  | 5,4   | 4,72 | 4,45 | 4,35 | 4,1  | 3,76 | 3,35 |
| 22    | 7,9                                     | 6,8   | 5,95  | 5,18 | 4,9  | 4,79 | 4,51 | 4,14 | 3,69 |
| 24    | 8,65                                    | 7,42  | 6,5   | 5,66 | 5,34 | 5,22 | 4,93 | 4,52 | 4,02 |
| 26    | 9,38                                    | 8,04  | 7,03  | 6,13 | 7,78 | 5,66 | 5,34 | 4,89 | 4,36 |
| 28    | 10,1                                    | 8,65  | 7,57  | 6,6  | 6,23 | 6,09 | 5,75 | 5,27 | 4,69 |
| 30    | 10,82                                   | 9,27  | 8,1   | 7,1  | 6,7  | 6,53 | 6,16 | 5,65 | 5,03 |
| 32    | 11,54                                   | 9,9   | 8,65  | 7,54 | 7,12 | 6,96 | 6,57 | 6,02 | 5,36 |
| 34    | 12,26                                   | 10,5  | 9,2   | 8,02 | 7,56 | 7,4  | 6,98 | 6,4  | 5,7  |
| 36    | 12,99                                   | 11,13 | 9,74  | 8,48 | 8,0  | 7,83 | 7,39 | 6,78 | 6,03 |
| 38    | 13,7                                    | 11,75 | 10,28 | 8,96 | 8,45 | 8,27 | 7,8  | 7,15 | 6,37 |

Используя их, можно рассчитать среднюю величину износа ленточек по формуле:

$$\overline{K_{\text{ЛО}}} = L \times \overline{I_{\text{КЛО}}},$$

где  $L$  – период эксплуатации между заточками.

#### **4.6. Стойкостная модель для типа производства**

Выше представлена зависимость (4.29) средней стойкости от диаметра, полученная в результате производственных испытаний спиральных сверл диаметрами от 10 до 35 мм [41] имеющая вид:

$$\overline{T} = 3,58d^{0,4}, \text{ час.}$$

Для определения степени влияния твердости обрабатываемых заготовок на среднюю стойкость сверл использовались результаты производственных испытаний, представленные

в главе 3 в таблице 3.2. На примере сверл близких диаметров 9,8 и 10,5 мм, которыми обрабатывались заготовки различной твердости 200 HB и 300 HB соответственно, получена зависимость, имеющая вид:

$$\bar{T} = 2,03 \cdot 10^9 \text{HB}^{-3,65}, \text{ час.}$$

Для определения степени влияния подачи на стойкость сверл использовалась зависимость, представленная в работе [50] (рисунок 4.4).

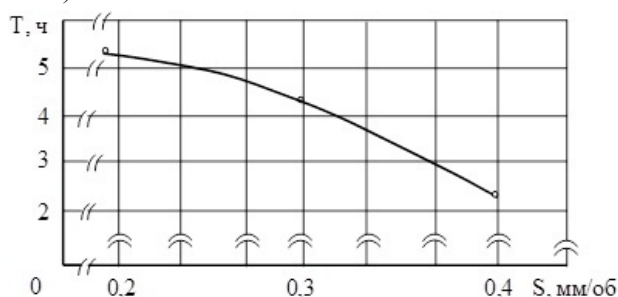


Рисунок 4.4 – Зависимость стойкости сверл диаметром 14,5 мм от подачи на скорости резания 15 м/мин.

Посредством аппроксимации кривой, представленной на рисунке 4.4, в диапазоне подач от 0,18 до 0,3 мм/об. получена следующая зависимость:

$$T = 2,72S^{-0,4}, \text{ час.}$$

Тогда, зависимость средней стойкости сверл от диаметра, твердости заготовок и подачи будет иметь вид:

$$\bar{T} = \frac{4,4 \cdot 10^8 d^{0,4}}{S^{0,4} \text{HB}^{3,65}}, \text{ час.} \quad (4.50)$$

В работе [51] аппроксимацией области максимума графика зависимости стойкости от скорости резания получено значение скорости резания максимума стойкости – 12,77 м/мин. Как видно в таблице 3.2, скорости резания, на которых проводились производственные испытания сверл, близки к скорости резания максимума стойкости. В работе [37] сделан вывод, что скорость резания, соответствующая максимальной стойкости быстрорежущих спиральных сверл при обработке углеродистых



конструкционных сталей, остается неизменной при изменении подачи, диаметра сверла и твердости обрабатываемого материала. Поэтому зависимость (4.50) можно использовать для расчета средней максимальной стойкости спиральных сверл диаметрами 10–35 мм.

Однако спиральные сверла находят широкое применение для всех типов производства, которые характеризуются объемом выпуска изделий. С уменьшением объема выпуска, переходом от массового к серийному и единичному производству производительность оборудования растет, что обусловлено увеличением номенклатуры изделий и переходом от автоматизированного оборудования к универсальному. Увеличение производительности оборудования возможно только за счет увеличения скоростей резания. В связи с этим возникает актуальная проблема разработки стойкостной модели спиральных сверл с учетом случайного характера процессов изнашивания для широкого диапазона скоростей резания.

Выше представлена зависимость (4.4) для расчета минимальной скорости резания в зависимости от объема выпуска изделий для обеспечения максимальной стойкости сверл при необходимой производительности оборудования, имеющая вид:

$$V = \frac{\pi d L_{cm}}{1000 \cdot S \cdot \sum T_{св}},$$

а также приведены зависимости стойкости от скорости резания, полученного в лабораторных условиях (4.17, 4.19). Первая получена аппроксимацией верхней части правой ветви этого графика на скоростях резания 16–21 м/мин., выше точки перегиба, вторая – на скоростях резания 21–30 м/мин., ниже точки перегиба.

$$T = 130211V^{-3,265},$$

$$T = 213V^{-1,15}.$$

Эти зависимости получены при проведении однофакторного эксперимента. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла специально изготавливались из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии, отбирались по идентичности

геометрических параметров и затачивались по двухплоскостной заточке с доводкой алмазным инструментом. Обработывались заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2P135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка контролировались осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, было полностью исключено влияние случайных факторов процесса обработки. Поэтому значения стойкостей, рассчитанных по ним, являются максимальными по отношению к распределению стойкостей сверл в производственных условиях эксплуатации.

В работе [20] приведены результаты производственных испытаний сверл различных диаметров. Испытывались партии сверл по 25 штук в каждой партии. Определено, что распределение стойкостей всех испытанных партий сверл хорошо согласуется с нормальным распределением, что позволило параметры этих распределений. В работе проведен анализ значимых связей коэффициентов вариации распределений стойкостей всех испытанных партий сверл с условиями обработки, который показал отрицательный результат. На основании этого сделан вывод, что теснота группирования стойкостей сверл не зависит от условий обработки сверлением, а это значит, что, используя правило трех сигма и средний коэффициент вариации, по зависимостям (4.17) и (4.19) можно рассчитать среднюю стойкость. В работе [20] приведены коэффициенты вариации распределений восьми партий сверл разного диаметра. Средний коэффициент вариации равен  $\bar{g} = 0,23$ . Тогда среднюю стойкость, при наличии максимальной, можно определить по формуле:

$$\bar{T} = \frac{T_{\max}}{(1 + 3\bar{g})}, \quad (4.51)$$

где  $T_{\max}$  – максимальная стойкость, рассчитанная по зависимостям (4.17) и (4.19).

С применением зависимости (4.51) зависимость (4.17) примет вид:

$$\bar{T} = 77048V^{-3,265}, \quad (4.52)$$

а зависимость (4.19) примет вид:

$$\bar{T} = 126V^{-1,15}. \quad (4.53)$$

Используя зависимости (4.50) и (4.52) получим зависимость (4.54) для расчета средней стойкости спиральных сверл на скоростях резания 16–21 м/мин., имеющую вид:

$$\bar{T} = \frac{3,5 \cdot 10^{12} d^{0,4}}{V^{3,265} S^{0,4} HB^{3,65}}. \quad (4.54)$$

В главе 1 приведена зависимость (1.1) рекомендуемая справочником технолога-машиностроителя [19] для расчета допустимых скоростей резания при сверлении. Эта зависимость получена на интенсивных скоростях резания, больших точки перегиба графика зависимости стойкости от скорости резания [18]. Рассчитанная по ней скорость резания при заданных подаче и периоде стойкости для любого диаметра сверла равна 24 м/мин. Зависимость (1.1) разработана комиссией по резанию металлов, в которую входили все ведущие специалисты в этой области, испытания проводились с высокой тщательностью и по единой методике, поэтому представляется целесообразным в зависимости средней стойкости на скоростях резания 21–30 м/мин. использовать показатель степени при подаче 0,5.

Используя зависимости (4.50) и (4.53) и показатель степени при подаче 0,5 получим зависимость (4.55) для расчета средней стойкости спиральных сверл на скоростях резания 21–30 м/мин., имеющую вид:

$$\bar{T} = \frac{4,9 \cdot 10^9 d^{0,4}}{V^{1,15} S^{0,5} HB^{3,65}}. \quad (4.55)$$

Справочником технолога-машиностроителя [19] рекомендуются периоды стойкости спиральных сверл для различных диаметров. Для сверл диаметрами от 10 до 35 мм рекомендуемые периоды стойкости соответствуют минимальным стойкостям, рассчитанным по зависимости (4.55) с применением зависимости (4.56). Тем самым подтверждается правомочность использования среднего коэффициента вариации  $\bar{\mathcal{G}} = 0,23$ .

$$T_{\min} = \bar{T} - 3 \bar{T} \bar{\mathcal{G}}. \quad (4.56)$$

где  $\bar{T}$  – средняя стойкость, рассчитанная по зависимости (4.55).

Стойкостная модель состоит из зависимостей (4.50), (4.54), (4.55) и работает следующим образом. Для определенного типа производства, исходя из необходимой производительности оборудования, по зависимости (4.4) рассчитывается минимальная скорость резания. Если расчетное значение скорости резания меньше 12,77 м/мин., принимается это значение скорости резания. Подача рассчитывается по зависимости (14.1).

В зависимости от значения скорости резания выбирается одна из зависимостей (4.50), (4.54) и (4.55) для расчета средней скорости резания. Далее используя зависимость (4.56) и средний коэффициент вариации равный 0,23 определяется стойкость с необходимой вероятностью безотказной работы  $\gamma$ . Для  $\gamma = 100\%$  принимается значение  $3 \bar{T} \bar{Q}$ , для  $\gamma = 95\%$  принимается значение  $2 \bar{T} \bar{Q}$ .

Таким образом, входными параметрами модели являются скорость резания, рассчитанная с учетом необходимой производительности оборудования, подача и твердость обрабатываемых заготовок, а выходными параметрами – стойкость сверл с необходимой вероятностью безотказной работы.

## ГЛАВА 5. КРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ТИПА ПРОИЗВОДСТВА

Анализ результатов лабораторных исследований, представленных в работе [36], позволил установить зависимость величины износа уголков при функциональном отказе сверл от скорости резания, график которой показан на рисунке 5.1. На нем видно, что скорость резания оказывает влияние на максимальную величину износа уголков в диапазоне 6–21 м/мин. В диапазоне скоростей резания 21–30 м/мин. такого влияния не наблюдается.

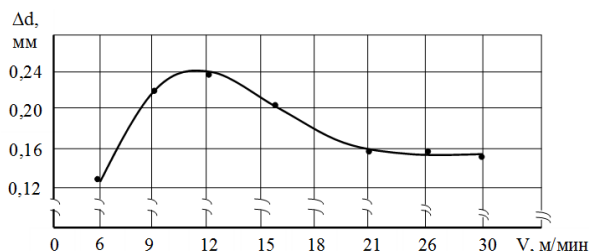


Рисунок 5.1 – Зависимость максимального износа уголков сверл, диаметром 10,2 мм от скорости резания при функциональном отказе

Это подтверждают результаты исследований, представленные в работе [39], которые выявили тесную взаимосвязь износов уголков и задних поверхностей на этих скоростях резания. Как известно, существующие критерии оптимального износа, рекомендуемые нормативной документацией для высоких скоростей резания, не зависят от скорости резания [29]. Корреляционный анализ результатов производственных испытаний сверл, выполненным в работе [51], показал, что износ задних поверхностей имеет значимую связь только с диаметром сверл. Поэтому задачей исследований является разработка и обоснование критериальной модели, зависящей от скорости резания и диаметра сверла для различных типов производства.

В работе главе 4 определено, что для аппроксимации областей максимумов (вершин горбов) кривых графиков подобных зависимостей применимы зависимости (5.1) и (5.2), степень точности при аппроксимации которыми зависит от характера кривой.

$$\Delta d = aV^b e^{-CV}, \quad (5.1)$$

$$\Delta d = \Delta d_m \left( V^a e^{-V^b} \right)^n, \quad (5.2)$$

Константа и показатели степени представленных зависимости находятся посредством решения системы логарифмических уравнений с координатами  $\Delta d_i$  и  $V_i$  произвольно выбранных точек на аппроксимируемой кривой (глава 4).

Константа находится посредством решения логарифмического уравнения

$$\ln a = \ln \Delta d_1 - b \ln V_1 + CV_1.$$

В результате аппроксимации кривой, представленной на рисунке 5.1, в диапазоне скоростей резания  $V = 9 - 16$  м/мин. зависимостью (5.1) получено следующее математическое выражение:

$$\Delta d = 0,0027 V^{3,103} e^{-0,2688V} \quad (5.3)$$

В таблице 5.1 представлены фактические и рассчитанные по зависимости (5.3) значения стойкости и погрешности расчетов.

Таблица 5.1 – Фактические и рассчитанные значения стойкости и погрешности расчетов

| Скорость резания V, м/мин.                                      | 9      | 12     | 16     |
|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Износ уголков $\Delta d_{\text{факт.}}$ , мм                    | 0,22   | 0,24   | 0,2    |
| Износ уголков $\Delta d_{\text{рассч.}}$ , мм, по формуле (5.3) | 0,2196 | 0,2394 | 0,1995 |
| Погрешность расчетов, %                                         | 0,18   | 0,25   | 0,25   |

В таблице 5.1 видно, что зависимость (5.3) дает высокую точность расчетов, средняя погрешность которых составляет 0,226 %.

Определение показателей степени зависимости (5.2) представлено в главе 4.

После определения показателя степени  $n$  значение  $\Delta d_m$  уточняется. Для этого рассчитываются значения  $\Delta d_{mi}$  по формуле:

$$\Delta d_{\max} = \frac{\Delta d_i}{\left(V_i^b e^{V_i^c}\right)^n},$$

а затем найденные значения  $\Delta d_{mi}$  усредняются.

В работах [52, 53] представлены способы определения скорости резания максимума горбообразных зависимостей, а в работе [54] приведена их классификация. Применение представленных в указанных работах способов позволило определить скорость резания максимума  $V_m$  графика зависимости, представленного на рисунке 5.1, которая равна 11,1 м/мин. На этой скорости резания величина износа уголков  $\Delta d_m$  равна 0,24 мм.

Практически значения износа уголков на скорости  $V_m$  и на скорости 12 м/мин. совпадают (рисунок 5.1), что не позволяет получить значение степени  $n$  на этой скорости, т.к. логарифм единицы равен нулю, поэтому аппроксимировать график, представленный на рисунке 5.1, зависимостью (5.2) не представляется возможным.

В работе [51] показано, что ниспадающие ветви графиков, подобных представленной на рисунке 5.1 зависимости, с достаточной степенью точности аппроксимируются степенной и экспоненциальной зависимостями (5.4) и (5.5):

$$\Delta d = aV^b, \quad (5.4)$$

$$\Delta d = ae^{bV}. \quad (5.5)$$

При аппроксимации кривой, представленной на рисунке 5.1 в диапазоне скоростей резания 16–21 м/мин. получены следующие зависимости (5.6) и (5.7):

$$\Delta d = 1,91V^{-0,815}, \quad (5.6)$$

$$\Delta d = 0,4e^{-0,044V}. \quad (5.7)$$

В таблице 5.2 представлены фактические и рассчитанные по зависимостям (5.6) и (5.7) значения стойкости и погрешности расчетов.

Меньшую погрешность расчетов дает зависимость (5.6), средняя погрешность расчетов которой составила 0,245 %, при максимальном значении 0,3 %. Тогда как средняя погрешность

Таблица 5.2 – Фактические и рассчитанные значения стойкости и погрешности расчетов

|                                                                |        |        |
|----------------------------------------------------------------|--------|--------|
| Скорость резания $V$ , м/мин.                                  | 16     | 21     |
| Износ уголков $\Delta d_{\text{факт.}}$ , мм                   | 0,2    | 0,16   |
| Износ уголков $\Delta d_{\text{расч.}}$ , мм, по формуле (5.6) | 0,1994 | 0,1597 |
| Погрешность расчетов, %                                        | 0,3    | 0,19   |
| Износ уголков $\Delta d_{\text{расч.}}$ , мм, по формуле (5.7) | 0,1978 | 0,1588 |
| Погрешность расчетов, %                                        | 1,1    | 0,75   |

расчетов зависимости (5.7) составила 0,925 % при максимальном значении 1,1 %.

Математические выражения (5.3) и (5.6) описывают зависимость максимального износа уголков сверл диаметром 10,2 мм от скорости резания в скоростном диапазоне от 9 до 21 м/мин. В этот диапазон входят скорости резания, используемые в автоматизированном массовом производстве, и крупносерийном и серийном производствах.

Представленные математические зависимости получены при аппроксимации результатов лабораторных исследований. В лабораторных условиях проводился однофакторный эксперимент. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла специально изготавливались из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии и отбирались по идентичности геометрических параметров, затачивались по двухплоскостной заточке с доводкой алмазным инструментом. Обработывались заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2P135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка контролировались осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, было полностью исключено влияние случайных факторов процесса обработки. Поэтому значения износов уголков на рисунке 1 являются максимально допустимыми для сверл данного диаметра.

В производственных условиях влияние случайных факторов процесса обработки определяет случайный характер процес-



сов изнашивания конструктивных элементов сверл, в результате чего имеет место существенное рассеивание стойкости. Анализ результатов производственных испытаний, представленный в работе [21], показывает, что во всех случаях распределение износов сверл нормальное и хорошо согласуется с законом нормального распределения Гаусса. Известно, что при нормальном распределении коэффициент вариации не может превышать значения 0,33, а использование его максимального значения гарантирует попадание всех возможных значений случайной величины под кривую нормального распределения. Тогда, используя правило трех сигма, мы имеем следующую зависимость:

$$\Delta d_{\max} = \overline{\Delta d} + 3\delta,$$

где  $\Delta d_{\max}$  – максимально допустимые значения износов уголков,  $\delta$  – среднее квадратическое отклонение,  $\delta = \overline{\Delta d} \cdot v$ , где  $v$  – коэффициент вариации, тогда  $\overline{\Delta d} = 0,503\Delta d_{\max}$ .

С учетом вышеизложенной зависимости (5.3) и (5.6) можно представить в виде:

$$\overline{\Delta d} = 0,0136V^{3,103}e^{-0,2688V}, \quad (5.8)$$

$$\overline{\Delta d} = 0,961V^{-0,815}. \quad (5.9)$$

В работе [55] получены математические выражения и средних коэффициент вариации, используя которые и зависимости (5.8) и (5.9) можно определить значения критерия допустимого износа  $\Delta d_0$  в зависимости от скорости резания и диаметра сверла с 95 % вероятностью безотказной работы инструмента ( $\gamma = 0,95$ ) в виде:

$$\Delta d_{0\gamma,95} = 7,095 \cdot 10^{-5} V^{3,103} e^{-0,2688V} d, \quad (5.10)$$

$$\Delta d_{0\gamma,95} = 5,217 \cdot 10^{-2} V^{-0,815} d, \quad (5.11)$$

$$\Delta d_{0\gamma,95} = 0,0062d. \quad (5.12)$$

Зависимости (5.10–5.12) представляют собой критериальную модель, полученную эмпирическим способом, в которой входящими параметрами являются скорость резания, подача и диаметр сверла, а выходящим – критерий допустимого износа. Реализация модели осуществляется следующим образом.

Для определенного типа производства, исходя из необходимой производительности оборудования, по зависимости (4.4, глава 4) рассчитывается минимальная скорость резания. Если расчетное значение скорости резания меньше 12,77 м/мин., принимается это значение скорости резания. Подача рассчитывается по зависимости (4.1, глава 4). Затем по зависимостям (10–12) рассчитывается критерий допустимого износа, обеспечивающий безотказную работу сверл. Зависимости предназначены: (5.10) – для автоматизированного массового производства, (5.11) – для крупносерийного и серийного и производств, (5.12) – для мелкосерийного и единичного производств.

Величина износа ленточек, обеспечивающая полное удаление дефектов износа при заточке рассчитывается по зависимостям (4.45, 4.46, глава 4).

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработана физическая модель стойкости сверл, включающая научное обоснование закономерностей их горбообразного характера.
2. Разработаны стойкостные модели быстрорежущих спиральных сверл, обеспечивающие их безотказность, с учетом условий эксплуатации и случайного характера процессов изнашивания.
3. Разработана и научно обоснована критериальная модель быстрорежущих спиральных сверл, обеспечивающая их безотказную эксплуатацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рагрин Н.А.* Определение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // *Машиностроитель*. 2012. № 3. С. 31–33.
2. *Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // *Электронное научно-техническое издание МГТУ им. Баумана*. М., 2011. № 10. 14 с. <http://www.techmag.edu.ru/index.html>.
3. *Рагрин Н.А.* Влияние скорости резания и износа рабочих элементов быстрорежущих спиральных сверл на динамические характеристики процесса сверления // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. Бишкек, 2008, № 14. С. 51–53.
4. *Сафонов Н.А.* Термодинамическая теория резания металлов // *Вестник металлопромышленности*. М., 1930. № 2, 9, 10.
5. *Глебов С.Ф.* Теория наивыгоднейшего резания металлов. М.–Л.: Госмашиздат, 1933. 112 с.
6. *Клушин М.И.* Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 453 с.
7. *Каширин А.И.* К вопросу о прочности режущей кромки инструмента при резании труднообрабатываемых сталей // *Трение и износ при резании металлов: сб. статей*. М.: Машгиз, 1955.
8. *Грудов П.П.* Скоростное резание // *Скоростные методы обработки металлов: сб. статей*. М.: Машгиз, 1948.
9. *Малкин А.Я.* Скоростная обработка твердых и закаленных сталей металлическим инструментом // *Скоростные методы обработки металлов: сб. статей*. М.: Машгиз, 1949.
10. *Зорев Н.Н., Фетисова З.М.* Обработка резанием тугоплавких сплавов. М.: Машиностроение, 1966. 224 с.
11. *Даниленко Б.Д., Котликова А.Л., Самсонов З.А.* Исследование возможностей повышения режущих свойств спиральных сверл // *Тр. МВТУ*. 1975. № 178. С. 44–61.

12. Даниленко Б.Д. К вопросу о выборе оптимального диапазона скоростей резания // Изв. вузов. Машиностроение. М., 1972. № 12. С. 172–175.
13. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
14. Студейников Г.В., Котликова А.Л., Даниленко Б.Д. Исследование режущих свойств сверл при сверлении сталей // Изв. вузов. Машиностроение. М., 1977. № 3. С. 172–175.
15. Студейников Г. В., Котликова А. Л., Даниленко Б. Д. Взаимосвязь стойкости сверл и износостойкости быстрорежущих сталей // Известия вузов. Машиностроение. М., 1978. № 4. С. 156–159.
16. Студейников Г.В. и др. Обрабатываемость сверлением конструкционных сталей // Обработка резанием: сб. трудов НИИмаш. 1982. № 7. С. 1–4.
17. Самсонов В.А. Влияние химического состава быстрорежущей стали на температурное состояние рабочей части сверла // Вестник машиностроения. 1973. № 2. С. 53–55.
18. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. С. 143–144.
19. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. С. 176–279.
20. Рагрин Н.А. Применение теории корреляции для получения зависимостей наработки от условий обработки сверлением // Машиностроение и инженерное образование. 2013. С. 21–29.
21. Рагрин Н.А. Обеспечение безотказности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Машиностроитель. М., 2012. № 7. С. 37–39.
22. Методика экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки. М.: НИИМАШ, 1982. 159 с.
23. Даниелян А.М. Резание металлов и инструмент. М.: Машгиз, 1950. 250 с.

24. *Рагрин Н.А.* Физическая модель стойкостной зависимости // Технология машиностроения. 2012. № 11. С. 11–17.
25. *Рагрин Н.А.* Признаки потери работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Техника и технология: новые перспективы развития: материалы III Международной научно-практической конференции. М.: Спутник+, 2011. С. 55–58.
26. *Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Нарыжный С.В.* Влияние скорости резания на наличие и высоту нароста при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2013. № 29. С. 158–160.
27. Оптимальные подачи спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития». М.: Спутник+, 2012. С. 81–84
28. *Аршинов В.А., Алексеев Г.А.* Резание металлов и режущий инструмент: учебник для машиностроительных техникумов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
29. Общемашиностроительные нормативы по износу, стойкости и расходу спиральных сверл. М.: НИИМАШ, 1980. 40 с.
30. *Рагрин Н.А.* Определение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. М., 2012. № 3. С. 31–33.
31. *Рагрин Н.А., Древаль А.Е.* Обеспечение надежности быстрорежущих спиральных сверл в автоматизированном производстве. Фрунзе: Киргиз НИИНТИ, 1988. 44 с.
32. *Рагрин Н.А.* Особенности процесса наростообразования при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2009. № 15. С. 126–129.
33. *Рагрин Н.А.* Влияние износа отдельных рабочих элементов на характер формирования отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Текник, 2009. № 19. С. 19–24.

34. *Рагрин Н.А.* Восстановление режущих свойств спиральных сверл // *Электронная техника.* М., 1984. Вып. 3. С. 20–21.
35. *Рагрин Н.А.* Повышение ресурса спиральных сверл // *Ресурсосберегающие технологии и прочность в машиностроении: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции.* Фрунзе, 1986. С. 16–17.
36. *Рагрин Н.А.* Пути повышения работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // *Известия КГТУ им. И. Раззакова.* Бишкек: Техник, 2011. № 22. С. 26–29
37. *Рагрин Н.А.* Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении // *Технология машиностроения.* М., 2013. № 12. С. 15–24.
38. *Грановский Г.И. и др.* Резание металлов. М.: Машгиз, 1954. 472 с.
39. *Рагрин Н.А.* Критерий оптимального износа быстрорежущих спиральных сверл // *Известия КГТУ им. И. Раззакова.* Бишкек: Техник, 2010. № 21. С. 43–45.
40. *Пустыльник Е.И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968. 288 с.
41. *Муслимов А.П., Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Зависимость наработки спиральных сверл от диаметра при рациональных параметрах режима резания // *Вестник КРСУ.* 2014. Том 14. № 2. С. 137–139.
42. *Муслимов А.П., Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Влияние твердости обрабатываемого материала на стойкость быстрорежущих спиральных сверл // *Вестник КРСУ.* 2013. Т. 13. № 7. С. 45–47.
43. *Рагрин Н.А.* Способы определения скорости резания экстремума стойкостной зависимости // «Научная дискуссия: вопросы технических наук»: материалы VIII Международной заочной научно-практической конференции (04 апреля 2013 г.). М.: Международный центр науки и образования, 2013. С. 74–78.
44. *Рагрин Н.А.* Пути повышения наработки до функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл на основе

- анализа кривых износа их режущих элементов // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Техник, 2012. № 26. С. 14–17.
45. *Рагрин Н.А.* Повышение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. М., 2011. № 7. С. 37–39.
46. *Муслимов А.П., Рагрин Н.А., Стародубов И.И.* Расчет стойкости быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Техник, 2013. № 30. С. 13–16.
47. *Древаль А.Е., Ткаченко И.В., Рагрин Н.А.* Модели отказов спиральных сверл // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности. М., 1992. С. 55–62.
48. *Мальшиев В.П.* Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. Алма-Ата: Наука, 1981. 116 с.
49. *Рагрин Н.А.* Исследование экстремума стойкостной зависимости при сверлении отверстий быстрорежущими спиральными сверлами / КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Техник, 2013. 90 с.
50. *Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Особенности влияния подачи на стойкость и наработку спиральных сверл // Техника машиностроения. М., 2013. № 4(88). С. 18–19.
51. *Рагрин Н.А.* Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. 2014. № 1. С. 49–54.
52. *Рагрин Н.А.* Способы определения точек максимума и перегиба стойкостной зависимости // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2013. № 29. С. 206–209.
53. *Рагрин Н.А.* Анализ способов определения скорости резания при максимальной стойкости спиральных сверл // Технология машиностроения. 2014. № 7. С. 20–24.
54. Классификация способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки спиральных сверл // Технология машиностроения. М., 2015. № 2. С. 11–14.
55. *Рагрин Н.А.* Критерий функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2012. № 26. С. 18–20.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Введение</b> .....                                                                                                           | 3  |
| <b>Глава 1. Анализ состояния проблемы</b> .....                                                                                 | 5  |
| 1.1. Условия экстремальности стойкостных зависимостей..                                                                         | 5  |
| 1.2. Анализ существующих стойкостных моделей .....                                                                              | 7  |
| 1.3. Анализ критериев отказа быстрорежущих<br>спиральных сверл .....                                                            | 9  |
| <b>Глава 2. Методы исследований</b> .....                                                                                       | 12 |
| <b>Глава 3. Физическая модель стойкостной зависимости</b> ..                                                                    | 14 |
| 3.1. Закономерности формирования максимума<br>зависимостей стойкости и наработки спиральных сверл<br>от скорости резания.....   | 14 |
| 3.2. Связь между скоростью резания и стойкостью сверл....                                                                       | 15 |
| 3.3. Физические процессы в диапазоне скоростей резания<br>максимума стойкостных зависимостей спиральных сверл .....             | 18 |
| 3.4. Влияние скорости резания на интенсивность износа<br>конструктивных элементов сверл.....                                    | 20 |
| 3.5. Износ уголков в диапазоне скоростей резания<br>максимума стойкостной зависимости .....                                     | 24 |
| 3.6. Закономерности горбообразного характера<br>зависимостей стойкости и наработки спиральных сверл<br>от скорости резания..... | 26 |
| 3.7. Влияние условий обработки на характер стойкостной<br>зависимости и характеристики ее максимума .....                       | 28 |
| 3.7.1. Влияние подачи .....                                                                                                     | 31 |
| 3.7.2. Влияние глубины резания .....                                                                                            | 34 |
| 3.7.3. Влияние твердости материала обрабатываемых<br>заготовок .....                                                            | 41 |



|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Глава 4. Стойкостные модели и их практическое</b>   |           |
| <b>применение в производстве .....</b>                 | <b>44</b> |
| 4.1. Пути обеспечения надежности при обработке         |           |
| сверлением.....                                        | 44        |
| 4.2. Выбор рациональных параметров режима резания .... | 44        |
| 4.3. Выбор рационального периода эксплуатации          |           |
| между заточками .....                                  | 46        |
| 4.4. Полное устранение дефектов износа                 |           |
| при заточке сверл.....                                 | 57        |
| 4.5. Нормативные таблицы наработки и износа            |           |
| быстрорежущих спиральных сверл.....                    | 61        |
| 4.6. Стойкостная модель для типа производства .....    | 63        |
| <b>Глава 5. Критериальная модель</b>                   |           |
| <b>для типа производства.....</b>                      | <b>69</b> |
| <b>Выводы .....</b>                                    | <b>74</b> |
| <b>Список литературы.....</b>                          | <b>75</b> |

**Н.А. Рагрин**

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ,  
СТОЙКОСТНЫХ И КРИТЕРИАЛЬНОЙ  
МОДЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ

Редактор *К.В. Тимофеева*  
Компьютерная верстка *А.Ш. Мельниковой*

Подписано в печать 12.07.2018.  
Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Печать офсетная.  
Объем 5,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 38.

Издательство КРСУ  
720000, Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, Бишкек, ул. Горького 2