## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

На правах рукописи

Васильев Дмитрий Вячеславович

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Артамонов Е.В.

Тюмень – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

| Глава 1 Состояние вопроса   |
|---|
| 1.1 Общие положения обрабатываемости 8  |
| 1.2 Физические основы обрабатываемости металлов 9                             |
| 1.2.1 Развитие направлений исследования обрабатываемости 11                   |
| 1.2.2 Ускоренное определение обрабатываемости металлов 13                     |
| 1.2.3 Влияние химического состава на обрабатываемость                         |
| 1.3 Влияние температурно – скоростного фактора на процесс резания и           |
| обрабатываемость металлов16   |
| 1.4 Виды и формы стружек и их классификация 25                                |
| 1.5 Теоретические основы процесса образования стружки                         |
| 1.6 Элементное стружкообразование   |
| 1.7 Механика процесса разрушения при образовании элементной стружки 39        |
| 1.8 Высокотемпературная хрупкость металлов 40                                 |
| 1.9 Напряженное состояние деформации и разрушение деталей 41                  |
| 1.10 Силовые нагружения, напряжения, деформации и разрушения в зоне резания43 |
| 1.11 Анализ проведенных работ. Цель и задачи исследования 50                  |
| Глава 2 Теоретические основы механики разрушения при обработке резанием 53    |
| 2.1 О механике контактного разрушения 53                                      |
| 2.2 Физико-механические основы механики разрушения материалов 54              |
| 2.3 Экспериментальные установка, устройство, оборудование и приборы 60        |
| 2.4 Тарировка динамометра и построение тарировочного графика 65               |
| 2.5 Метод ускоренного тарирования естественной термопары 67                   |
| 2.6 Результаты экспериментальных исследований зависимости величины фаски      |
| износа по задней поверхности от температуры 73                                |
| 2.7 Результаты экспериментальных исследований характеристик механики          |
| процесса резания в зависимости от температурно – скоростного фактора 77       |
| 2.8 Выводы  |
| Глава 3 Имитационное моделирование процесса стружкообразования                |

| 3.1 Силовые граничные условия  |
|--|
| 3.2 Напряженно - деформированное состояние стружки с применением МКЭ 86    |
| 3.3 Достоверность полученных результатов моделирования процесса резания 90 |
| 3.4 Выводы   |
| Глава 4 Экспериментальные исследования зависимостей деформации и формы     |
| стружки от температуры резания 94  |
| 4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимости вида стружки от  |
| температуры  |
| 4.2 Механика процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого |
| материала 100  |
| 4.3 Выводы 114   |
| Глава 5 Практическая реализация 115  |
| 5.1 Новые технические решения 115  |
| 5.1.1 Разработанный и запатентованный способ 115                           |
| 5.1.2 Разработаное и запатентованое устройство 119                         |
| 5.2 Разработанные методики 120   |
| 5.3 Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных         |
| материалов на станках с ЧПУ 123  |
| 5.4 Программа выбора условий максимальной обрабатываемости жаропрочных     |
| материалов по виду стружки на основе температуры появления                 |
| высокотемпературного охрупчивания 128                                      |
| 5.5 Выводы   |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ   |
| ЛИТЕРАТУРА   |
| ПРИЛОЖЕНИЯ   |

#### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В современной промышленности при механической обработке материалов резанием основными становятся следующие показатели: быстрое освоение новой высокоприбыльной продукции без потери качества с высокой производительностью процесса.

В настоящее время наработан большой экспериментальный материал по определению режимов резания при обработке деталей из различных материалов, который положен в основу справочных данных.

Однако, по-прежнему, проблемой в современном машиностроении остается определение режимов максимальной обрабатываемости при обработке жаропрочных материалов при освоении производством новых изделий. Для определения режимов резания с условиями максимальной работоспособности инструментов необходимы продолжительные дорогостоящие стойкостные лабораторные испытания, обусловленные большой трудоемкостью работы, приводящие к определённым финансовым затратам, а также к потере времени.

Поэтому решение задачи формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов по виду и коэффициенту сплошности стружки путем управления температурой резания через изменение скорости резания является актуальной.

Аналитические исследования взаимосвязи явлений при резании обрабатываемых металлов и их механических характеристик, видов стружки были проведены по данным различных школ резания металлов (Томской, МГТУ "Станкин", Курганской, Тюменской). Экспериментальные исследования выполнялись автором в лабораторных и производственных условиях и включали в себя самостоятельное дробление стружки под воздействием разной температуры резания с применением разработанных установок.

Существует большое количество практических рекомендаций в инструментальных каталогах и справочниках по назначению рациональных режимов резания, но не существует экспресс методики научно-обоснованного выбора и формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов. Комплексная методика выбора режимов резания на основе физикомеханических характеристик обрабатываемого материала, обеспечивающих условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов, обуславливает значительный экономический эффект.

Исследования проводились с помощью методов экспериментальной механики. Определение влияния температуры на физико-механические свойства обрабатываемых материалов проводились по стандартным методикам с применением новых разработанных установок и приспособлений.

В первой главе приведен литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований по теме диссертации. На основании литературного анализа изучены методы определения условий максимальной обрабатываемости, которые направлены на установление рациональных условий обработки, включающие в себя определение влияния температурно-скоростного фактора на механические характеристики обрабатываемого материала, обрабатываемость и работоспособность инструмента при резании. На основе информационного анализа выявлены основные способы определения условий максимальной обрабатываемости металлов при резании.

На основании изложенного выше были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе изучено научное явление высокотемпературного охрупчивания металлов, зависимости механических характеристик от температуры и вида разрушения при механической обработке резанием, приведены разработанные экспериментальные установки и устройства для исследования механического процесса резания металлов. Описаны результаты экспериментальных исследований.

Сформулирована и на основании результатов экспериментов доказана гипотеза о том, что температура максимальной обрабатываемости жаропрочных металлов на железной и никелевой основе соответствует температуре высокотемпературного охрупчивания, при которой зависимости величин механических характеристик обрабатываемого материала ( $\psi$ ,  $\delta$ ) от температуры имеют минимальные значения и могут проявляться в процессе резания следующими признаками: 1- минимальным значением силы резания P<sub>Z</sub> и потребляемой мощностью при резании;

2- минимальным значением относительного поверхностного износа по задней поверхности режущего лезвия инструмента h<sub>OII3min</sub>, обуславливающим максимальную обрабатываемость материалов;

3- изменением вида стружки из сливной в элементную;

4 - уменьшением коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub> до минимальных значений.

Представлены результаты лабораторного эксперимента в процессе, которого определялись усадка и вид стружки на специальном запатентованном устройстве, измерялись силы резания, средняя температура резания. Определение величины относительного поверхностного износа по задней поверхности режущих элементов и коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub> производилось с помощью комплекса электронных оптических приборов: микроскопа МГ (х 3,7), окуляра электронного USB.

**В третьей главе** приведены результаты имитационного моделирования процесса стружкообразования с применением метода конечных элементов (МКЭ), а также исследований механики процесса резания и образования стружки во всём температурном диапазоне резания металлов. Показано расположение опасных напряжений растяжения  $\sigma_1$ , напряжений сжатия  $\sigma_3$ , эквивалентных напряжений  $\sigma_{_{3KB}}$ , по которым были построены эпюры напряжений в продольном сечении стружки. Приведённые картины направлений векторов в узловых точках обрабатываемого материала позволили построить траектории зон напряжения растяжения и сжатия в стружке, по которым можно построить линии основного напряжения сдвига.

Анализ результатов исследования НДС стружкообразования показал, что опасные напряжения растяжения σ<sub>1</sub> имеют максимальные значения как в теоретической плоскости сдвига, так и в стружке за пределами этой плоскости, которые возможно в условиях высокотемпературного охрупчивания могут послужить очагами разрушения.

**В четвёртой главе** В результате экспериментальных исследований было установлено, что при увеличении температуры во всем температурном диапазоне резания металлов изменяются состояние материала стружки из пластического в хрупко – пласти-

ческое, а затем в хрупкое и соответственно вид стружки: сливная, суставчатая, элементная.

На основании анализа результатов исследования НДС, коэффициента сплошности и вида стружки выявлена механика разрушения при превращении обрабатываемого материала в стружку, которая хорошо коррелирует с результатами визуального анализа видов стружки в зависимости от температуры резания.

Предложено новое определение и зависимость коэффициента сплошности стружки  $k_s$ , как отношение проекций в поперечном сечении стружки площади сплошного слоя к максимальной площади стружки,  $k_s=S_2/S_1$ , где  $S_1$ — максимальная площадь поперечного сечения стружки;  $S_2$  — площадь сплошного слоя поперечного сечения стружки.

Таким образом по виду и коэффициенту сплошности стружки можно определять диапазон температуры условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при механической обработке резанием (3 и 4 признаки гипотезы).

**В пятой главе** приведены три разработанные методики формирования условий максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов твердосплавным инструментом на основе четырёх признаков доказанной гипотезы: в лабораторных условиях, экспресс методика, в производственных условиях.

### Глава 1 Состояние вопроса

#### 1.1 Общие положения обрабатываемости

Формирование условий максимальной обрабатываемости при обработке жаропрочных материалов является важной технико-экономической задачей в области машиностроения. Значение этой задачи особенно возрастает в связи с широкой автоматизацией машиностроительного производства, применением станков с числовым программным управлением, автоматических станочных линий и многооперационных станков, а также широким использованием новых материалов, как правило обладающих низкой обрабатываемостью резанием [14]. Формирование условий максимальной обрабатываемости при обработке жаропрочных материалов на металлорежущих станках может быть осуществлено только на основе изучения физической сущности явлений, сопровождающих процесс резания.

Обычно установление условий максимальной обрабатываемости при обработке жаропрочных материалов производится путем длительных стойкостных опытов и является трудоемким экспериментом. Практически важно, хотя бы приближенно, без стойкостных опытов, установить для заданного конкретного случая условия максимальной обрабатываемости, режимы и температуру резания.

Вопросам исследования процессов образования стружки, влияния скорости резания и температуры на процесс деформации, силы и напряжения, обрабатываемости материалов, работоспособности инструмента при резании посвятили свои работы ученые: Безъязычный В.Ф., Бобров В.Ф., Васин С.А., Верещака А.С., Грановский Г.И., Грановский В.Г, Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Гузеев В.И., Гольдшмидт М.Г., Даниелян А.М., Драчев О.И., Зорев Н.Н., Клушин М. И., Кривоухов В.А., Куфарев Г.Л., Кушнер В.С., Лоладзе Т.Н., Макаров А.Д., Нодельман М.О., Подураев В.Н., Полетика М. Ф., Петруха П.Г., Петрушин С.И., Промптов А.И., Резников А.Н., Розенберг А. М., Розенберг Ю.А., Силин С.С., Старков, В.К., Талантов Н.В., Тахман С.И., Шаламов В. Г., Щепетильников Ю.В., а также научная школа Утешева М.Х.: Артамонов Е.В., Некрасов Ю.И., Барбышев Б.В., и другие.

#### 1.2 Физические основы обрабатываемости металлов

Одним из важнейших технологических свойств металлов является обрабатываемость при резании. Она характеризует свойства металлов, определяющих производительность обработки резанием и себестоимость операций.

В связи с этим, в науке о резании металлов одной из главных задач является исследование обрабатываемости металлов при меняющихся условиях обработки различными режущими инструментами. Данная задача решается с целью определения условий максимальной обрабатываемости металлов при резании в зависимости от их физико-механических характеристик [40],[66],[107].

На сегодняшний день есть понимание того, что обрабатываемость металлов зависит от их химического состава и структурного состояния. Однако проблема состоит в том, что данная зависимость необычайно сложна и должна учитывать влияние целого комплекса механических и теплофизических свойств металлов, изменяющихся в зависимости от температуры, а также некоторые параметры, связанные со свойствами кристаллической решётки обрабатываемых металлов.

В дополнение к этому существенное влияние на обрабатываемость оказывают параметры инструмента и характеристики инструментального материала. Именно поэтому обрабатываемость отдельно взятого металла значительно меняется при смене инструментального материала.

Количество исследовательских работ в области обработки материалов резанием, направленных на определение обрабатываемости материалов и формирование условий максимальной обрабатываемости, является значительным и неуклонно растёт. Это обусловлено разработкой и внедрением огромного количества новых металлов во всех областях промышленности. Дополнительная проблема состоит в том, что большинство новых металлов обладают лучшими механическими и физическими характеристиками. Это влечёт за собой ухудшение обрабатываемости металлов резанием и, как следствие, повышение себестоимости обработки.

В связи с этим возникает необходимость в создании новых методов обработки, прогрессивных инструментальных материалов и улучшенных конструкций металлорежущего инструмента. А в этом случае опять невозможно обойтись без определения условий максимальной обрабатываемости металлов. Без проведения таких исследований обычно допускается назначение заведомо низких режимов резания, что влечет за собой снижение производительности и повышение себестоимости обработки. В некоторых случаях допускается назначение завышенных режимов резания, что приводит к существенному увеличению расхода режущего инструмента и существенному повышению затрат на него.

Полное определение обрабатываемости конкретного металла обычно подразумевает:

- установление оптимальной марки инструментального твердого сплава для каждой операции;
- установление рациональных конструктивных и геометрических параметров металлорежущих инструментов;
- установление зависимостей формы, вида, и типа стружки от геометрических параметров металлорежущих инструментов и режимов резания;
- установление силовых зависимостей в процессе резания;
- установление зависимостей стойкости металлорежущих инструментов от различных параметров;
- установление зависимостей качества обработанной поверхности деталей и величины износа инструмента от геометрических параметров металлорежущих инструментов и режимов резания;
- установление необходимости применения СОЖ и оптимальных параметров СОЖ;
- установление зависимостей параметров обрабатываемости металла от различных видов термической обработки.

В результате проведённой работы должны быть разработаны руководящие материалы и рекомендации разработки технологических процессов обработки данного материала, а также нормативы по режимам резания.

В связи с тем, что полное определение обрабатываемости продолжительно по времени и требует больших финансовых затрат и при этом существенно влияет на себестоимость обработки, период освоения продукции и объемы финансовых вложений остро необходима разработка расчетных и ускоренных экспериментальных методов установления параметров обрабатываемости металлов. Это особенно важно потому, что обрабатываемость необходимо учитывать в составе оцениваемых свойств при разработке перспективных металлов и сплавов, создаваемых металлургической отраслью.

#### 1.2.1 Развитие направлений исследования обрабатываемости

Российские ученые — основоположники науки о резании металлов уделяли большое внимание обрабатываемости металлов. Тиме И. А. исследовал влияние обрабатываемых металлов на допускаемые скорости резания и сопротивление резанию. По результатам исследований он разработал таблицу соответствия скоростей резания при обработке металлов различными режущими инструментами.

Первым кто попытался установить взаимосвязь обрабатываемости с температурой резания был Я. Г. Усачев в 1912—1914 гг.

Существенный вклад в исследование обрабатываемости металлов резанием внес С. Ф. Глебов. Он, в результате анализа существующих данных, сделал вывод о существенном влиянии на обрабатываемость металлов их теплопроводности.

И. Ф. Клоков выявил, что помимо влияния на механические свойства, структура стали оказывает влияние и на обрабатываемость резанием. Он показал экспериментально, что механические характеристики стали при разных методах обработки резанием, оказывают влияние на обрабатываемость не одинаково.

В. Д. Рамоновым исследована обрабатываемость материалов при разных чистовых способах обработки.

Большое число частных вопросов обрабатываемости металлов на разных операциях решены в лабораториях резания металлов на предприятиях: Московском автомобильном, Горьковском автомобильном, Уралмашзаводе, Кировском (г. Ленинград), Ижевском машиностроительном.

Огромное внимание в период тридцатых годов прошлого столетия было оказано экспериментальному определению закономерностей изменения степенных показателей в формуле:

$$\upsilon = \frac{C_{\upsilon}}{T^m t^{x_{\upsilon}} s^{y_{\upsilon}}} \tag{1.1}$$

Исследования И. М. Безпрозванного, К. Е. Зверева, К. И. Жебровского, В. А. Кривоуховова, Д. В. Лобанова, С. С. Рудника и А. Н. Резникова позволили определить, что степенные показатели формулы (1.1) в большой степени зависят от характеристик обрабатываемых и инструментальных материалов. При одних и тех же обрабатываемом и инструментальном материалах степенные показатели закономерно меняются с переменой абсолютных значений переменных, т. е.

$$\upsilon = \frac{C_{\upsilon}}{T^{m=f(T,t,s)} t^{x_{\upsilon}=f(T,t,s)} s^{y_{\upsilon}=f(T,t,s)}}$$
(1.2)

Несмотря на большой объем работ по исследованию обрабатываемости металлов резанием, в настоящее время не существует упрощенных и достаточно точных методов определения этого свойства, не существует общепринятых единиц измерения [14].

Считается, что у материала хорошая обрабатываемость, если при его обработке износ режущей части инструмента и значения сил резания минимальны, а инструментальная стойкость и качество поверхности после обработки достаточно высокие. Хорошая обрабатываемость при резании материала характеризуется простым отделением стружки и высокой точности деталей после обработки. Так как характеристики процесса обработки, определяющие обрабатываемость материалов, в большой степени зависимы от режимов резания, качества инструментального материала, геометрических параметров инструмента, то отсюда появляется задача, возникающая при количественном выражении этого свойства. Но количественная оценка обрабатываемости материалов нужна для правильного их определения и изготовления [14].

Комплекс характеристик, определяющих обрабатываемость, взаимосвязаны с физико-механическими характеристиками материала, а соответственно, с его составом и структурой.

Карбиды, выделяемые в местах, где концентрируются напряжения при деформации труднообрабатываемых материалов, что в значительной степени снижает местную пластичность и меняет характер разрушения режущей части инструмента: вязкое переходит в хрупкое разрушение.

Эти явления отражаются на обрабатываемости материалов, так как даже при значительной скорости пластического деформирования, сопровождающейся большой температурой, происходят структурные превращения [58], [59].

#### 1.2.2 Ускоренное определение обрабатываемости металлов

Существует несколько методов ускоренного определения обрабатываемости материалов.

**Метод торцевой обточки**. Этим методом можно быстро выявить зависимость *Т*—*v*, и таким образом, обрабатываемость материала [117],[138].

Метод заключается в следующем: диск, выполненный из испытываемого материала, на токарном станке точат торцевую поверхность диска от центра к периферии с одним числом оборотов n, т.е. с изменением окружной скорости резания. Дабы избежать трения торца диска о заднюю грань резца, в диске сверлится отверстие диаметром  $d_0 = 30-40$  мм.

Т.о. скорость *v* меняется в пределах  $v_o \div v_n$ , где:  $v_o = \frac{\pi d_0 n}{1000}$ ;  $v_{n_1} = \frac{\pi d_1 n}{1000}$ ;

d<sub>1</sub> —диаметр по торцу, на котором затупился инструмент.

В таком случае, по известной зависимости

$$T = \frac{C}{\upsilon^m} \text{ или } T\upsilon^m = C \tag{1.3}$$

Определяется величина постоянной С:

$$C = \frac{\upsilon_n^m r_n}{s \cdot n(m+1)} \tag{1.4}$$

где *т*— степень относительной стойкости;

s — поперечная подача в *мм/об;* 

r<sub>n</sub>— фактический радиус, на котором произошло притупление резца;

 $v_{nl}$ — скорость резания в момент затупления резца на окружности диаметра  $d_{l}$ .

Метод радиоактивных изотопов [89]. Сейчас при определении износа обрабатывающего инструмента стали использовать радиоактивные металлы, для чего рабочие поверхности инструмента подвергают радиоактивации. Например, при облучении твердосплавных инструментов в них возникают радиоактивные изотопы титана, вольфрама и кобальта. Кобальт имеет период полураспада 5,3 года, а продуктом распада является никель. При распаде вольфрама (с периодом полураспада — 24,1 часа) получаем рений. В процессе обработки, в результате износа передней и задней поверхностей, а также режущей кромки резца, частицы радиоактивного металла попадают на обработанную поверхность и на поверхность стружки. Эти частицы обнаруживаются при помощи счетчика Гейгера или фотопластинки, накладываемой на исследуемую поверхность. В этом случае на фотопластинке в местах переноса обнаружатся темные пятна, интенсивность почернения и их размер будут зависеть от массы радиоактивной частицы.

Определение обрабатываемости по частоте сдвигов элементов стружки [101]. Способ определения обрабатываемости материалов резанием, при котором в процессе резания измеряют силу и скорость резания, регистрируют мгновенные значения силы резания по толщине элементов стружки, полученных в процессе резания, определяют частоту сдвигов указанных элементов стружки и дополнительно измеряют среднюю температуру резания, затем получают зависимость частоты (f) сдвигов элементов стружки от параметра  $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{P}_{\mathbf{z}} \times \mathbf{9}/\mathbf{T}$  или W/T:

$$\mathbf{f} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{P}_{z} \times \boldsymbol{\vartheta}/\mathbf{T}) = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{W}/\mathbf{T}), \quad (1.5)$$

где P<sub>z</sub> - главная составляющая силы резания, H;

θ - скорость резания, м/с;

Т - средняя температура резания, К;

W - мощность резания, Вт,

затем в рабочем процессе определяют частоту мгновенных сил резания и по указанной зависимости  $\mathbf{f} = \mathbf{\phi}(\mathbf{s})$  определяют величину обобщенного параметра  $\mathbf{s}$ , по которой судят об обрабатываемости.

Способы определения обрабатываемости, существующие на сегодняшний день основываются в основном на длительных стойкосных испытаниях, требующих больших затрат времени и материальных ресурсов.

### 1.2.3 Влияние химического состава на обрабатываемость

Главными показателями, которые характеризуют количественную сторону обрабатываемости корозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов, являются их химический состав и структурное строение. Высокое влияние на обрабатываемость оказывают легирующие элементы, содержащиеся в сплавах, ухудшая обрабатываемость резанием. Наиболее интенсивно влияют на обрабатываемость корозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов отдельные легирующие элементы, представленные в таблице 1.2.1[39-40], [106], [119], [120],[129],[130].

Таблица 1.2.1 – Коэффициент і<sub>э</sub>, определяющий воздействие легирующих элементов на обрабатываемость при резании

| Элемент   | C   | A1  | Ti | Si | Mo  | Co  | Mn  | Cr  | W   | Ni | NB | В |
|-----------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|---|
| $i_{\Im}$ | 150 | 120 | 40 | 25 | 5,0 | 3,5 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 0  | 0  | 0 |

Поправочный коэффициент  $k_{\nu}^{\acute{Y}}$ , приведенный в таблице, учитывает воздействие изменения содержания легирующего элемента на скорость резания, и опре-

деляется по формуле 
$$k_{\nu}^{\acute{Y}} = \left(1 + \frac{\dot{i}_{\acute{Y}}}{100} |\Delta_{\acute{Y}}|\right)^{\frac{|\Delta_{\acute{Y}}|}{\Delta_{\acute{Y}}}},$$
 (1.6)

где  $i_a$  — интенсивность воздействия легирующего элемента на скорость резания;  $\Delta$  э— разница между содержанием легирующего элемента в исследуемой корозионностойкой или жаропрочной стали (сплаве) по сравнению с исходной в процентах.

Из формулы 1.17 видно: если  $\Delta_{\ni} > 0$ , то  $k_{\upsilon}^{\acute{Y}} > 1$ ; если  $\Delta_{\ni} < 0$ , то  $k_{\upsilon}^{\acute{Y}} < 1$ .

На обрабатываемость корозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов, помимо углерода, содержимое которого в металле в чрезвычайно малых количествах, максимальное влияние оказывают Al, Ti, Si, а минимальное Mo, Co, Mn, Cr, W. Практически никакого влияния на обрабатываемость не оказывают Ni, Nb, B.

На ухудшение обрабатываемости воздействие углерода, алюминия и титана можно объяснить образованием на их основе дисперсных фаз, которые упрочняют твердый раствор сплава. Особенно большое отрицательное воздействие углерод оказывает на обрабатываемость, если он находится в твердом растворе, например, после закалки. Трансформация углерода методом отжига в карбиды снижает его негативное воздействие. Присутствие титана резко ухудшает обрабатываемость при условии, что его количество в сплаве пятикратно превышает концентрацию углерода. При этом образуется интерметаллидная связь титана с никелем, выде-

ляющаяся в высокодисперсной форме при отжиге или отпуске и приводящая к упрочнению сплава.

Значительно ухудшает обрабатываемость резанием легирование сплавов молибденом и вольфрамом более 2—3%, которые отличаются от  $\gamma$  – железа значениями атомных радиусов и типом кристаллической решетки. Допускаемая скорость резания  $v_{20}$  при обработке точением сплава 10Х16H25AM6, в котором содержится 6,7% Мо, является меньше в два раза, чем для сплава, не содержащего молибден. А элементы, имеющие сравнительно одинаковые значения этих параметров, (к примеру, Cr, Ni), снижают обрабатываемость незначительно. Например, повышение в два раза процентного содержания хрома в сплаве X23H18 (Cr=24%), в сравнении со сплавом 1X14H14B2M (Cr=13%), снижает скорость резания лишь на 13%. Никель является основным легирующим элементом корозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов, он тоже не влияет на обрабатываемость из-за близкого кристаллического строения с  $\gamma$  – железом и если в металле отсутствует титан полностью растворяется в нем. Кремний в металле сильно снижает обрабатываемость резанием [39-40], [106], [114].

Корозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы в зависимости от химического состава делятся по обрабатываемости при резании на восемь групп (приложение 5) [51]. Классификация таких материалов по химическому составу допускает определять конструкции и режимы обработки инструментов не только известных марок сталей и сплавов, но и создаваемых вновь.

# 1.3 Влияние температурно – скоростного фактора на процесс резания и обрабатываемость металлов

Определению рациональных условий резания и условий максимальной обрабатываемости материалов посвящены работы российских ученых Авакова А.А., Боброва В.Ф.[39-40], Верещаки А.С. [46-47], Зорева Н.Н. [55-56], Кушнера В.С.[68-70], Лоладзе Т.Н. [75], Макарова А.Д. [77], Некрасова Ю.И. [90], Петрушин [103], Подураева В.Н.[106], Полетики М.Ф. [107-109], Промптова А.И. [110], Розенберга А.М. и Еремина А.Н. [116], Розенберга Ю.А. [117], Резникова А.Н.[115], Силина

16

С.С.[120], Старкова В.К. [125], Третьякова И.П. [135] и другие.

В работе [46] профессором Верещакой А.С. определены и систематизированы факторы, влияющие на работоспособность инструментов. При этом характеристики инструментального материала оказывают основное влияние на работоспособность инструмента, а значит и косвенно отражают условия максимальной обрабатываемости при резании. Также он сформулировал, что инструментальный материал с износостойким покрытием является новым материалом композиционного типа, в котором сочетаются свойства поверхностного слоя (высокое значение твердости, теплостойкости, пассивности по отношению к обрабатываемому материалу и т. д.) и свойства, проявляющиеся в объеме тела инструмента (прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т.д.).

С целью изучения и определения факторов, определяющих условия максимальной обрабатываемости, проанализируем взаимосвязи явлений при обработке материалов резанием. Этими вопросами занимались Томские ученые- Розенберг А.М. и Еремин А.Н. [116]. В результате проведенных исследований с измерением температур, возникающих на токарном резце в зоне передней поверхности, с использованием метода естественной термопары, указанными учеными, было определено, что температура на передней поверхности определяет величину действительного угла резания  $\delta_1$  и нароста вне зависимости от того, какими соотношениями V и а эта температура достигнута. В том случае, если температуры резания на передней поверхности при разных условиях обработки были одинаковыми, наблюдается один и тот же угол  $\delta_1$  нароста, при различных скоростях резания и толщинах среза на резцах с одинаковыми геометрическими параметрами. Основываясь на проведенных исследованиях, учеными Зорева Н.Н. и Промптова А.И., был сделан вывод о том, что, несмотря на то, что коэффициент усадки стружки при механической обработке сталей изменяется в широких пределах, его величина определяется не скоростью резания и толщиной среза, а температурой в зоне контакта передней поверхности инструмента со стружкой. На этот вывод натолкнуло то, что зависимости усадки

стружки, полученные в широком диапазоне изменения скоростей резания и толщин среза, совмещаются в случае их построения в зависимости от температуры на передней поверхности инструмента, как показано на рисунке 1.1а. На рисунке 1.1б для каждого переднего угла получен свой график, что вполне нормально, в связи с тем, что изменение переднего угла приводит к изменению направления равнодействующей силы, оказывающей влияние на усадку стружки, следовательно, передним углом или углом резания можно оперировать как самостоятельным фактором. Таким образом, в связи с тем, что температура на передней поверхности резца, где происходит взаимодействие стружки и инструмента оказывает существенное влияние на угол резания  $\delta_1$ (действительный) и коэффициент трения по передней поверхности, можно сделать вывод, что усадка стружки на инструменте с постоянными геометрическими параметрами определяется не скоростью резания и толщиной срезаемого слоя, а исключительно температурой на передней поверхности инструмента (температурой резания). С целью доказательства постоянства усадки стружки вне зависимости от скорости резания и толщины срезаемого слоя, но при постоянной температуре на передней поверхности, указанными учеными были проведены исследования при токарной обработке материала Сталь 20Х в области образования нароста, результаты которых представлены на рисунке 1.2. В ходе проведения этих исследований, например, для токарного резца с углом резания δ=91° производили изменение скорости резания от 23 м/мин для толщины среза а=0,51 до 120 м/мин для толщины среза а=0,4 мм, при этом для различных толщин среза устанавливалась скорость обработки, обеспечивающая постоянство температуры на передней поверхности инструмента. Для токарных резцов с углами резания  $\delta$ =73° и 58° при токарной обработке материала из стали 20Х в области образования нароста получены те же результаты. Необходимо дополнить, что эти же результаты получены при исследованиях, проведенных на других обрабатываемых материалах, например, при точении чугунов. Однако при этом не было возможности производить измерения усадки стружки, но производились измерения угла

18

β<sub>1</sub> в процессе обработки, который определяет положение плоскости сдвига стружки. По результатам этих измерений определялись значения относительных сдвигов, которые при построении зависимости от температуры на передней поверхности при различных подачах расположились на одной кривой, представленной на рисунке 1.3.



а – при точении стали 40 (γ=10°) (Н.Н. Зорев);
б – при торцовом фрезеровании стали 10 (А.И. Промптов)
Рисунок 1.1 - Усадка стружки, как функция температуры на передней поверхности



ф=90°, υ≠const, t°=const Рисунок 1.2 -Усадка стружки ξ при условии постоянной температуры на передней поверхности (обработка стали 20Х)

Рисунок 1.4 - Действительный передний угол  $\gamma_1$  как функция температуры на передней поверхности инструмента и переднего угла  $\gamma$ 





Рисунок 1.3 - Относительный сдвиг є, как функция температуры на передней поверхности при токарной обработке чугуна.



Следовательно, при обработке как вязких, так и хрупких обрабатываемых материалов при соблюдении постоянства температуры на передней поверхности деформация не зависит от толщины срезаемого слоя. Учеными Розенбергом А.М. и Ереминым А.Н.[116] в зависимости от температуры на передней поверхности инструмента проведены и обобщены многочисленные исследования по образованию и существованию нароста, установлены диапазоны существования переднего угла нароста  $\gamma_1$ . Проанализировав рисунок 1.4, можно сделать вывод, что начало образования нароста происходит при температурах от 80 до 100 °C вне зависимости от значений переднего угла  $\gamma$ инструмента. При повышении температур на передней поверхности инструмента происходит постепенное увеличение угла нароста  $\gamma_1$ , который приобретает максимальное значение при температуре t<sub>2</sub>=300 °C, после чего угол нароста  $\gamma_1$  постепенно снижается до тех пор, пока не приобретет значение переднего угла  $\gamma$  инструмента при температуре на передней поверхности t<sub>3</sub>, различной для разных инструментальных материалов.

Для определения рациональных условий обработки, очень важно знать зависимости площади обработанной поверхности (vTs) и пройденного пути инструмента (vT) от скорости резания при различной толщине среза.

В результате исследований, проведенных в Грузинском политехническом институте, построены приведенные на рисунках 1.5, 1.6 графики изменения стойкости, площади обработанной поверхности и пути резания в зависимости от изменения температуры и скорости резания при обработке жаропрочных сплавов и сталей при различной толщине срезаемого слоя для твердосплавного и быстрорежущего инструментов [75]. Построенные зависимости vT=f( $\theta$ ) показывают, что максимальные значения пройденного пути при различной толщине срезаемого слоя, соответствуют примерно одинаковым температурам резания и минимальным значениям интенсивности износа. При обработке резанием стали 40X резцом оснащенным инструментальным твердым сплавом T15K6 наблюдаются максимальные значения пути резания при температуре 730–760 °C, что иллюстрирует рисунок 1.5, б. А при обработке резанием жаропрочного сплава XH70MBTЮБ резцом, оснащенным инструментальным твердым сплавом BK8, максимальные значения пути резания наблюдаются при температуре 680–720 °C, что иллюстрирует рисунок 1.6, б.



1 - a = 0,037мм/об; 2 - a = 0,1мм/об; 3 - a = 0,3мм/об; 4 - a = 0,5мм/об

Рисунок 1.5 – Графики зависимостей vT от скорости резания V (а) и от температуры резанияθ (б) при токарной обработке инструментом из сплава T15K6 материала Сталь 40X при различных толщинах среза [75].



1 - a = 0,1 MM; 2 - a = 0,3 MM

Рисунок 1.6 – Графики зависимостей vT от скорости резания V (а) и от температуры резания θ (б) при токарной обработке инструментом из сплава BK8, материала XH70MBTЮБ при различных толщинах среза [75].

Судя по всему нестабильность процесса наростообразования в зоне низких скоростей резания при токарной обработке инструментом, оснащенным инструментальными твердыми сплавами, вызывает резкое снижение стойкости. Это объясняется действующими на инструмент пульсирующими, а зачастую знакопеременными нагрузками.

Эти условия ведут к выкрашиванию относительно крупных фрагментов инструментального твердого сплава, что существенно увеличивает интенсивность износа.К этому приводят высокая твердость нароста, малая прочность инструментального твердого сплава и пульсирующие, а зачастую знакопеременные нагрузки при низких скоростях резания. Соответственно, применение инструмента оснащённого инструментальными твердыми сплавами при низких скоростях обработки и, соответственно, температурах на передней поверхности нерационально, так как при этом наблюдается существенное снижение стойкости и пути резания [6], [7].

Особое внимание заслуживает тот факт, что максимальное значение пути резания, максимальное значение площади срезаемого слоя при различной толщине срезаемого слоя примерно соответствует одинаковой температуре резания.

Профессором А.Д. Макаровым [77] сформулировано и доказано положение о постоянстве оптимальной температуры резания: оптимальным скоростям резания (для неизменной пары инструментальный - обрабатываемый материал) вне зависимости от комбинаций подачи, глубины и скорости обработки соответствует постоянная температура в зоне резания, которая получила название оптимальной температуры резания.

Несмотря на то, что положение постоянства оптимальной температуры резания первоначально было установлено исключительно для токарной обработки материалов разных групп обрабатываемости, в дальнейших работах экспериментально подтвердилась справедливость данного положения для всех видов обработки материалов резанием: нарезания резьбы, зубофрезерования, сверления, фрезерования и т.д.

Более того, на основании проведенных экспериментов А.Д. Макаров сформулировал семь существенных с научной точки зрения следствий, одно из которых приведено в качестве примера:

Следствие I. При неизменной паре инструментальный - обрабатываемый материал точкам минимума зависимостей интенсивности износа от скорости резания для инструментов вне зависимости от комбинации геометрических параметров инструмента (r, φ, φ1, γ, λ, α и др.) соответствует постоянная оптимальная температура резания, несмотря на то, что оптимальные скорости

резания при этом изменяются кардинально, как, например, показано на рисунке 1.7 [77].



Влияние скорости резания на температуру резания и интенсивность износа резца при точении деталей из стали 15Х18Н12СТЮ с различными глубинами резания, подачами и геометрическими параметрами режущей части (α<sub>1</sub>, γ, φ, φ<sub>1</sub>, λ, r)

Рисунок 1.7 - Доказательство первого следствия по данным А.Д. Макарова [77]

На основании рассмотренного следствия можно сделать вывод о том, что оптимальная температура резания связывает между собой геометрические параметры инструмента и оптимальные режимы резания. Подобные выводы можно сделать и на основании анализа остальных следствий.

Все следствия А.Д. Макарова, представленные в приложении 9, подтверждают наличие соответствия оптимальной температуры резания температуре максимальной обрабатываемости материала.

Силиным С.С. [120], на основании большого количества опытов, представленных на рисунках1.8 ÷ 1.9, сделан вывод о том, что в момент стабилизации составляющей силы резания P<sub>Z</sub>, когда она рассматривается как функция от скорости резания при постоянной глубине резания и подаче наблюдаются минимальные значения относительного поверхностного износа и шероховатости, что соответствует оптимальной температуре резания. На основании вышеизложенного профес-



сором Силиным С.С. [120] была разработана методика определения оптимальных

$$t = 10^{-3} \text{m}; \ \phi = 45^{\circ}; \ \phi_1 = 45^{\circ}; \ \gamma = 12^{\circ}; \alpha = 12^{\circ}; r = 10^{-3} \text{m}$$
  
$$1 - s = 0,074 \cdot 10^{-3} \text{m}; \ 2 - s = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{m}; \ 3 - s = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{m}; \ 4 - s = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{m};$$
  
$$5 - s = 0,30 \cdot 10^{-3} \text{m}; \ 6 - s = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{m}; \ 7 - s = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

Рисунок 1.8 – Температурно-силовые зависимости при обработке сплава XH56BMKЮ инструментом из ИТС BK8

условий обработки по установке момента, при котором наступает стабилизация главной составляющей силы резания P<sub>Z</sub> при постоянном изменении скорости V, при неизменных остальных параметрах.



 $V = 0,013 \div 1,34 \text{ м/c}; s = 0,074 \div 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}; t$ = 1÷5<sup>-3</sup>м; $\phi$  = 45°; $\phi_1$  = 45°;  $\gamma$  = 12°;  $\alpha$  = 12°; r = 10<sup>-3</sup> M 1 - s = 0,074 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 2 - s = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 3 - s = 0,15 \cdot 10<sup>-3</sup> m; 4 - s = 0,25 \cdot 10<sup>-3</sup> m; 5 - s = 0,30 \cdot 10<sup>-3</sup> m; 6 - s = 0,34 \cdot 10^{-3} m; 7 - s = 0,39 \cdot 10^{-3} m Рисунок 1.9 – Температурно-силовые зависимости при обработке сплава ХН73МБТЮ инструментом из ИТС ВК6М В результате анализа проведенных исследований сделан вывод о том, что для любого инструментального материала вне зависимости от обрабатываемого материала, режимных условий, геометрических параметров, СОЖ, величины температуры подогрева материала, имеется постоянная оптимальная температура резания  $\theta_0$ , которая обеспечивает минимальное значение относительного поверхностного износа, отражающая условия максимальной обрабатываемости.

#### 1.4 Виды и формы стружек и их классификация

Профессор Бобров В.Ф.[39-40] типы стружек при резании относил к одному из главных технологических показателей обрабатываемости.

Стружка, образующаяся при резании, характеризуется видом и формой. В 1870 г. И. А. Тиме была предложена классификация типов стружек, образующихся при резании различных материалов. Классификация оказалась настолько удачной, что, несмотря на то, что со времен И. А. Тиме появились совершенно иные конструкционные материалы, обрабатывающиеся с иными режимами резания, ею пользуются и в настоящее время. Согласно этой классификации при резании конструкционных материалов в любых условиях образуются четыре вида стружки: элементная, суставчатая, сливная и надлома. Элементную, суставчатую и сливную стружку называют стружками сдвига, так как их образование связано с напряжениями сдвига. Стружку надлома иногда называют стружкой отрыва, так как ее образование связано с растягивающими напряжениями [39],[40].



а - элементная; б - суставчатая; в - сливная; г - надлома

Рисунок 1.10 – Типы стружек, образующихся при резании пластичных и хрупких материалов (И. А. Тиме)

Элементная стружка, представленная на рисунке 1.10, а), состоит из отдельных «элементов» 1 приблизительно одинаковой формы, не связанных или слабо связанных

друг с другом. Границу *т*–*n*, отделяющую образовавшийся элемент стружки от срезаемого слоя, называют поверхностью скалывания. У суставчатой стружки, представленной на рисунке 1.10, б), разделения ее на отдельные части не происходит. Поверхность скалывания только наметилась, но она не пронизывает стружку по всей толщине. Основным признаком сливной стружки, представленной на рисунке 1.10, в), является ее сплошность (непрерывность). Стружка надлома, представленная на рисунке 1.10, г) состоит из отдельных, не связанных друг с другом кусочков различной формы и размеров [39]. Образованию стружки надлома сопутствует мелкая металлическая пыль. Поверхность разрушения *т*–*n* может располагаться ниже поверхности резания, в результате чего последняя покрыта следами от выломанных из нее кусочков стружки.

Тип стружки во многом зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала. При резании пластичных материалов возможно образование первых трех типов стружки: элементной, суставчатой и сливной. По мере увеличения твердости и прочности обрабатываемого материала сливная стружка переходит в суставчатую, а затем в элементную. При обработке хрупких материалов образуется или элементная стружка, или стружка надлома.

Наиболее сильно на тип стружки влияют такие геометрические параметры инструмента как передний угол и угол наклона главного лезвия. При обработке пластичных материалов влияние углов γ и λ принципиально одинаково: по мере их увеличения элементная стружка переходит в суставчатую, а затем в сливную [39].

На тип стружки оказывают влияние подача (толщина срезаемого стоя) и скорость резания. Глубина резания (ширина срезаемого слоя) на тип стружки практически не влияет. Увеличение подачи (толщины срезаемого слоя) приводит при резании пластичных материалов к последовательному переходу от сливной стружки к суставчатой и элементной [39], [55], [56], [106].

Наиболее сложно на тип стружки влияет скорость резания. При резании большинства углеродистых и легированных конструкционных сталей, если исключить зону скоростей резания, при которых образуется нарост (смотри ниже), по мере увеличения скорости резания стружка из элементной становится суставчатой, а затем сливной.

26

При обработке некоторых жаропрочных сталей и сплавов повышение скорости резания, превращает сливную стружку в элементную. В работах Боброва В.Ф.[39-40] и Подураева В.Н. [106], акцентируется внимание на то, что физическая причина этого явления полностью не выяснена [106]. В настоящее время наиболее подробно изучен процесс сливного стружкообразования. Образование элементной стружки при резании как пластичных, так и хрупких материалов изучено недостаточно [39].

Форма стружки имеет решающее значение при оценке условий удаления стружки из зоны резания, это является важнейшей характеристикой процесса резания. Степень дробления стружки выражается *объемным коэффициентом*  $\chi$ , показанным в таблице 1.4.1, определяемым как отношение объема полученной стружки  $V_c$  к объему снятого при этом материала срезаемого слоя  $V_M$ . Величину объемного коэффициента определяют путем измерения объема с помощью мерного сосуда  $V_c$  и массы  $G_c$  произвольного количества стружки.

Исходя из этого, объем снятого металла  $(cm^3)$ 

 $V_{\rm M} = 1000 {\rm G_c}/{\rm \rho},$ 

(1.7)

где  $\rho$  — плотность,  $r/cm^3$ .

Величина объемного коэффициента уменьшается с измельчением стружки.

Более точно различать виды стружек можно по анализу направлений деформированных частиц материала в стружке, т.е. по текстуре стружки [68][106]. Сливные стружки могут иметь текстуру, одинаковую по всему сечению стружки (однородную текстуру), являющуюся результатом деформаций металла при переходе частиц из детали в стружку через зону стружкообразования. Однако более характерно изменение направления линий текстуры в контактной области стружки вблизи передней поверхности инструмента. Последнее свидетельствует о наличии контактной застойной зоны пластических деформаций, как показано на рисунке 1.11.



*а* - сливной (*1* - резец, 2 - линии текстуры стружки, *3* - линии текстуры в зоне контактных пластических деформаций, *4* - форма зерен материала до деформации, 5 - зона стружкообразования); *б* - элементной или псевдосливной (1 - элемент стружки, 2 - резец, 3 - деталь)

Рисунок 1.11 – Схема образования различных видов стружек[68] нему виду непрерывная «сливная» и фактически состоит из отдельных, связанных между собой элементов, то ее называют псевдосливной, как показано на рисунке 1.11, б). Образование таких стружек характерно для обработки титановых сплавов, аустенитных сталей.

В большинстве работ, связанных с исследованием стружкообразования, принадлежность к той или иной форме стружки определяется визуальным путём на основе использования метода бальных оценок. С этой целью разрабатываются классификационные таблицы включающие различные типы стружек, их размеры и относительные характеристики.

Как упоминалось выше, одним из первых классифицировавших стружку по типам: сливная, суставчатая, элементная и надлома был Тиме И.А., эта классификация позже была дополнена учеными Куфаревым Г.Л. [67], Нодельманом М.О. [92-93], Подураевым В.Н. [106], Розенбергом Ю.А. [117], Лоладзе Т.Н. [75]и другими.

Наиболее подробно виды стружки классифицировал Нодельман М.О. [92], как показано на рисунке 1.13, обращая внимание на естественные и искусственные факторы, обуславливающие их образование: режимы резания, параметры заточки режущего инструмента с плоскими гранями, износ режущего инструмента, специ-

альные устройства, придающие стружке необходимое завивание и направление, а также дискретное точение и кинематическое дробление стружки. Но представленная классификация стружки основана на визуальном определении вида стружки и носит субъективный характер, а классифицируемую по ней стружку сложно анализировать с другими характеристиками процесса резания.



витки большого диаметра

б) закрученные лентообразные полосы

в) неправильной формыклубки

г) короткие плоские стружки

д), е), ж) завивание вокругоси, параллельной основнойплоскости

з), и), к) вокруг оси, расположенной под углом к основной плоскости завивание вокруг оси, перпендикулярной основной плоскости

м) «вьюн» разделяется на отдельные витки, почти замкнутые кольца

н) в виде плоской спирали

 о) в виде конической спирали

 п) показаны стружки, состоящие из витков развернутой спирали.

р) из связанных между собой полуколец

с) имеющие вид запятой

т) из отдельных, мелких витков

Рисунок 1.13 – Основные виды форм стружек

По представлению Куфарева Г.Л. основной формой стружки следует считать винтовую спираль, поэтому он предложил классификацию типов стружек, представленную на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Классификация типов спиральной стружки [60]

Но данная классификация не охватывает суставчатую и элементную стружки.

Надо отметить, что стружку можно классифицировать не только по форме и длине, но и по коэффициенту усадки стружки или объёмному коэффициенту, как показано в таблице 1.4.1 [106].

Таблица 1.4.1 Классификация стружки по объёмному коэффициенту

| Форма стружки   | Объемный ко-<br>эффициент х | Эскиз         |
|---|-----------------------------|---------------|
| Лентообразная:<br>а) прямая<br>б) путаная<br>в) дробленая | 300-400<br>200-300<br>15-20 |               |
| Спиральная:<br>а) длинная<br>б) короткая<br>в) плоская    | 60-80<br>40-45<br>10-15     | inne interior |
| Дробленая:<br>а) связанная<br>б) несвязанная              | 8-9<br>5-6                  |               |

Наиболее подходящая классификация качественной оценки стружки была представлена Лавровым Н.К. [71], в которой помимо формы стружки представлены размерные характеристики длины спирали стружки, как показано в таблице 1.4.2.

|   | Форма стружки                                    |  |   |  |  |  |  |
|---|--|--|---|--|--|--|--|
| Качественная<br>оценка формы<br>стружки | Для индиви-                                      | Для массового производства                   |   |  |  |  |  |
|   | дуального и серии-<br>ного производств           | в поточных ли-<br>ниях                       | в автоматических линиях                       |  |  |  |  |
| Оптимальная                             | Спиральная отрез-<br>ками длиной 50—<br>150 мм   | Спиральная от-<br>резками длиной<br>30—80 мм | Спиральными отрезками<br>длиной 30—80 мм      |  |  |  |  |
| Хорошая                                 | Непрерывная<br>спиральная                        | Крупнодробле-<br>ная в виде колец            | Крупнодробленая в виде ко-<br>лец и полуколец |  |  |  |  |
| Удовлетворитель-<br>ная                 | Крупнодробленая в<br>виде колец и полу-<br>колец | и полуколец<br>Непрерывная<br>спиральная     | Мелкодробленая                                |  |  |  |  |
| Неудовлетвори-<br>тельная               | Мелкодробленая,<br>прямая; путаная               |  | Непрерывная спиральная, прямая лента, путаная |  |  |  |  |

| Таблица 1.4.2 – Классификация кач | чественной оценки стружки |
|-----------------------------------|---------------------------|
|-----------------------------------|---------------------------|

Однако для полной характеристики стружки в этой классификации измерение по длине стружки необходимо не только для сливной и суставчатой, но и для элементной стружки, поэтому автором было предложено определять размерные характеристики стружки по длине спирали, а если стружка состоит только из одного завитка, то по диаметру завитка стружки.

### 1.5 Теоретические основы процесса образования стружки

Одной из основных характеристик физико – механических свойств обрабатываемого материал является так называемая предельная степень деформации  $\varepsilon_{Mnp}$ , при достижении которой начинается процесс разрушения. Необходимо иметь в виду, что на величину  $\varepsilon_{Mnp}$  влияют температура и скорость деформации. При стружкообразовании степень деформации обрабатываемого материала изменяется от нуля до конечной величины [117]. При обработке пластичных материалов уменьшение переднего угла и изменение скорости резания может нарушить соотношение  $\varepsilon_k$  и  $\varepsilon_{Mnp}$  таким образом, что будет образовываться элементная стружка (чаще всего - связанная).

Результаты многочисленных исследований показывают, что тип образующейся при резании стружки определяется рядом факторов:

 пластическими свойствами обрабатываемого материала, задающими уровень предельной степени деформации материала є<sub>Мпр</sub> в соответствии с температурноскоростными условиями обработки;

достижимой при заданных условиях обработки максимальной величиной степени деформации *ε*<sub>k</sub>, определяемой в основном передним углом инструмента и скоростью резания;

долей объёмности деформации, определяемой соотношением размеров
 срезаемого слоя  $\frac{\dot{a}}{b}$ ;

скоростью резания (температурой в зоне стружкообразования).

По макроструктурному строению можно различить следующие типы стружек:

1) Угол текстуры в основной массе стружки постоянен, стружка является цельным телом - сливная стружка, как показано на рисунках 1.14, а).

2) Угол текстуры в стружке переменен, на свободной её стороне наблюдаются периодические изменения формы, но сама стружка является цельным телом - суставчатая стружка, как показано на рисунках 1.14, б).

Стружка имеет элементарное строение, в ряде случаев элементы отделены друг от друга, как показано на рисунке 1.14, г) или соединены слоем, сформированным в результате процессов на передней поверхности инструмента, как показано на рисунке 1.14, в). Угол текстуры в каждом элементе переменен, в зоне конечного сдвига элемента и в зоне контакта элемента с передней поверхностью этот угол имеет наименьшие значения (в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента этот угол нужно рассматривать по отношению к этой поверхности) элементная стружка. По мнению И.А. Тиме процесс образования элемента стружки состоит из двух фаз. В первой фазе происходит вдавливание инструмента



Рисунок. 1.14 Фотографии микрошлифов продольного сечения стружек, полученных при точении стали 45 с различными передними углами

в металл, происходит процесс сжатия. Этот процесс ограничен плоскостью, проходящей от вершины инструмента под некоторым углом ф к направлению передней поверхности инструмента. Во второй фазе происходит скалывание элемента в направлении вышеуказанной плоскости.

Аналогичную точку зрения на схему образования элементной стружки имел В.Ф. Бобров [39]. Сперва происходит процесс сжатия. Когда напряжения сжатия превзойдут предел текучести материала обрабатываемой детали начнётся его течение по передней поверхности. При исчерпании запаса пластичности материала происходит его разрушение по плоскости скалывания.

Большое исследование процесса образования элементной стружки было выполнено в Томском политехническом институте [116, 117], [52], [131]. Исследования проводились при микро-, средних и высоких скоростях резания. На основании результатов этих исследований разработаны основные положения образования элементной стружки:

1. Образование элементной стружки - периодический (циклический) процесс. Начальная стадия образования одного элемента перекрывает конечную стадию образования предыдущего элемента.

2. Образование элемента стружки начинается с входа инструмента под металл переменной толщины от нуля до максимальной величины, равной толщине среза.

3. Образование элементной стружки это в основном процесс плоской деформации- деформации сдвига. В силу периодичности процесса образования элементной стружки величины деформации в образованном элементе распределяются неравномерно.

4. Сдвиг в зоне стружкообразования происходит при напряжении от силовой нагрузки, превышающей напряжение, имевшее место при предшествующей деформации.

5. Разрушение металла в момент отделения элемента стружки (конечный сдвиг или «скол» элемента) происходит в зоне, где металл получил деформацию, равную предельной, и при напряжении, равном пределу текучести максимально упрочненного материала (пределу прочности, выраженному в касательных напряжениях, соответствующему предельной степени деформации материала  $\varepsilon_{\text{MnD}}$ );

6. Металл элемента стружки в зоне её контакта с передней поверхностью инструмента также получает максимальные деформации и напряжения, близкие к предельным значениям.

Изучение профиля поперечных сечений стружек при различных скоростях резания [75]на рисунке 1.15 показывает следующее: градиент деформации



Рисунок. 1.15 – Очертания поперечных сечений стружек при различных скоростях резания: несвободное резание:  $\gamma = 0^{\circ}$ ;  $\phi = 60^{\circ}$ ;  $\phi_1 = 15^{\circ}$ ;  $\alpha_1 = \alpha = 8^{\circ}$ ;  $\lambda = 0^{\circ}$ ; S = 0,54 мм/об; t = 2мм

по боковой поверхности не равен нулю и деформацию срезаемого слоя следует рассматривать только лишь как объемную задачу. Характерно, что в этом случае большая часть срезаемого металла не превращается в стружку, а течет в поперечном направлении и остается на обработанной детали. Объем стружки меньше теоретического объема срезаемого слоя. Очертания поперечных сечений стружки и срезаемого слоя сильно отличаются, что является следствием неравномерной деформации [75].



Рисунок 1.16 – Корень стружки скалывания с координатной сеткой, при свободном резании титанового сплава; V= 8,5 м/мин, t= 0,9 мм, шириной сре-

за 2,5 мм

1.6 Элементное стружкообразование

Элементные стружки характеризуются большим разнообразием и различаются по:

1) форме и размерам образующихся элементов;

 стабильности процесса стружкообразования (повторяемости элементов по форме и размерам);

3) характеру деформации внутри элемента;

4) прочности связей между элементами.

При элементном стружкообразовании формирование каждого элемента является самостоятельным актом пластического деформирования, завершающимся частичным или полным разрушением.

Элементную стружку, подобную изображен-

ной на рисунке 1.16, в дальнейшем будем называть стружкой скалывания. Она ха

рактерна для пластичных металлов, обрабатываемых при низких скоростях и температурах резания [117].

С повышением пластичности обрабатываемого материала величина деформации, получаемой элементом до его отделения, возрастает, что приводит к увеличению размеров элемента, как показано на рисунке 1.17.

При высоких скоростях и температурах реза-



Рисунок 1.17 – Низкотемпературная элементная стружка [117]

ния образуется элементная стружка, как показано на рисунке 1.19. От стружки показанной на рисунке 1.18, она отличается тем, что текстура внутри элементов отсутствует.



Рисунок 1.18 – Низкотемпературная суставчатая стружка, сталь 45;

γ=-10°; V=61м/мин,[117] жения, препятствующих дальнейшему перемещению элемента по этой поверхности.

Возникающая трещина развивается в направлении вектора скорости резания а, внутри элемента при этом создается напряженнодеформированное состояние, близкое к равномерному, как показано на рисунке 1.19, выходя на поверхность срезаемого слоя в любом случайном месте[45], [61], [62], [63].

Вся пластическая деформация сосредоточена в местах стыка элементов и в контактном слое.

При формировании очередного элемента происходит локальный высокотемпературный сдвиг.

Стружка отрыва возникает в процессе формирования элемента на передней поверхности лезвия при создании условий самотормо-



Рисунок 1.19 – Высокотемпературная суставчатая стружка [126]

Основными параметрами элементного стружкообразования являются угол скалывания элемента, средние размеры элемента, толщина стружки, коэффициент сплошности (отношение толщины сплошной части стружки к ее полной толщине) и другие деформационные параметры, а также параметры, характеризующие изменение во времени компонента силы резания, средних напряжений и пр. Как уже отмечалось, на сегодняшний день еще не создано не только единой теории, охватывающей все виды элементного стружкообразования, но и частных теорий, описывающих наиболее стабильные процессы (например, высокотемпературное элементное стружкообразование).

Тем не менее, изучением элементного стружкообразования занимались многие ученые (начиная с И.А. Тиме). Накоплено много экспериментальных дан-
ных. Среди наиболее информативных работ, посвященных данному вопросу, необходимо назвать исследования Ю.А. Розенберга[117], М.Ф. Полетика[107-109], М.Г. Гольдшмидта [48], А.И. Афонасова [34], Н.В. Талантова [126-128], А.А. Кривоухова [65-66], А.В. Благовещенского [38] и др.

Среди вопросов, изучавшихся названными и другими учеными, особый интерес представляет вопрос об условиях перехода от одного вида стружкообразования к другому (от сливного к элементному и обратно). Среди факторов, определяющих этот переход, наиболее значимыми являются свойства обрабатываемого материала, передний угол лезвия, скорость резания, толщина среза, свойства среды. С увеличением толщины среза инициируется переход от сливной стружки к элементной. Этот очень давно замеченный и до сих пор удовлетворительно не объясненный факт связан, по-видимому, с влиянием толщины среза на напряженное состояние в окрестности режущей кромки - зоне зарождения трещины, отделяющей сформированный элемент [49], [50].

Наиболее сложно влияют на вид стружкообразования свойства обрабаты-

ваемого материала. Это вызвано тем, что помимо очевидного влияния на него механических свойств, вид стружкообразования зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала.

Показано, что в данном случае, как и при сливном стружкообразовании, важную роль играет температурно-скоростной фактор, причем для многих обрабатываемых материалов с повышением скорости и температуры резания переход от одного вида стружкообразования к другому происходит дважды: сначала (при низких температурах) элементная стружка пере-



Рисунок 1.20 – Диаграмма, воздействия температурно-скоростного фактора и свойств обрабатываемого материала на вид стружки [109]

ходит в сливную, дальнейшее же повышение температуры вызывает обратный

переход сливной стружки в элементную [109]. При этом и тот и другой переходы происходят постепенно (через суставчатую стружку). Прочность связи между элементами с повышением скорости и температуры резания изменяется плавно, переходя через максимум. При низких скоростях резания (стружка скалывания) связь между элементами очень слабая, как показано на рисунке 1.42. С повышением указанных параметров связи между элементами становятся прочнее, как показано на рисунке 1.41, а с дальнейшим повышением скорости резания стружка скаростях и температурах резания прочность связей между элементами вновь ослабевает. Сливная стружка переходит в высокотемпературную элементную, как показано на рисунке 1.38, причем с усилением температурно-скоростного фактора прочность связей между элементами высоких температурах резания снижается, пока, наконец, при очень высоких температурах резания снижается, пока, наконец, при очень высоких температурах резания температурную элементами стемпературах резания снижается, пока, наконец, при очень высоких температурах резания снижается, пока, наконец, при очень высоких температурах резания температурную элементами температурную элементами температурную элементами вновь ослабевает.

Схематично влияние обрабатываемого материала на вид стружкообразования может быть представлено диаграммой на рисунке 1.20. По горизонтали на диаграмме откладываются значения температурно-скоростного фактора, а по вертикали - значения комплексного параметра, характеризующего свойства обрабатываемого материала:  $\mathbf{K}_{\mathbf{M}} = \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{\lambda}$ ; (1.8)

где δ - относительное удлинение при разрыве; λ, - коэффициент теплопроводности.

Каждому обрабатываемому материалу на диаграмме соответствует своя горизонталь. Для большинства машиностроительных материалов диапазон сливного стружкообразования ограничен и слева (низкие скорости), и справа (высокие скорости). Для некоторых высокопластичных материалов (например, свинца) горизонталь располагается выше условной разделительной линии: эти материалы не образуют элементной стружки ни при каких условиях. Материалы, горизонталь для которых лежит ниже разделительной линии, во всем диапазоне изменения температурно-скоростного фактора образуют только элементную стружку.

## 1.7 Механика процесса разрушения при образовании элементной стружки

Механика процесса разрушения хорошо поясняется с помощью схемы простого



Рисунок 1.21 – Схема формирования текстуры стружки

сдвига образования текстуры стружки (определённая направленность с деформированных зёрен в металле стружки)[117], как представлено на рисунке 1.21. В результате сдвига сторон квадрата (окружности) получается параллелограмм (эллипс). Ось эллипса определяет угол текстуры  $\psi$ .

При увеличении скорости резания размеры зоны пластической деформации уменьшаются и для скоростей резания, используемых на производстве, эти размеры составляют 10 - 15 % от толщины снимаемого слоя.

Сужение зоны пластической деформации объясняется повышением предела текучести материала при деформировании его с большими скоростями. Следует также отметить, что в зоне стружкообразования компоненты деформации не одинаковы и деформированное состояние в этой зоне является неоднородным, поэтому правильнее называть схему пластической деформации при образовании стружки неоднородным простым сдвигом.

В основной массе металла стружки (сливной) деформированное состояние является однородным.

Основными характеристиками элементной стружки являются шаг элемента «т» и коэффициент сплошности «k» [117]. Коэффициент определяется из отношения толсплошности щин стружки,  $k = \frac{a_2}{a_1}$ , где  $a_1$  – максимальная толщина элемента стружки, а2 – толщина сплошного слоя стружки, как представлено на рисунке 1.22.



Рисунок 1.22 – Расчетная схема для конечной стадии образования элемента стружки

#### 1.8 Высокотемпературная хрупкость металлов

Из практики известны случаи, хрупкого разрушения в деталях работающих при высоких температурах. Особенности высокотемпературного разрушения металлов впервые были отмечены в 1912 г. Розенгейном и Эвеном [154]; они считали, что характер разрушения является функцией температуры. Высокотемпературное разрушение металлов освещено во многих теоретических и экспериментальных исследованиях [78],[79],[123],[124].

Например, для жаростойких металлов, проявляющих склонность к хрупким разрушениям при высоких температурах, изменение относительного удлинения с повышением температуры в полулогарифмических координатах изображается V-образной кривой, представленной на рисунке 1.23.



Рисунок 1.23 – Зависимость механических характеристик сталей от температуры

Нарушение закономерности в изменении относительного удлинения материала с повышением температуры (излом V-образной кривой) является следствием изменений в механизме межзеренного разрушения, представленного на рисунке 1.24. Для таких условий может быть определена критическая температура (T° <sub>м</sub>). Под критической температурой в данном случае понимается температура, при которой при определенной скорости деформации прекращается падение относи тельного удлинения и начинается его подъем (точка A V-образной кривой, на рисунке 1.23 а).



Рисунок 1.24 — Межзеренное разрушение стали XH35BT:  $a - \delta_p = 2,3\%$ ,  $\theta = 650^{\circ}C$ ;

$$\delta - \delta_p = 9$$
 %,  $\theta = 700^{\circ}$ C

Аналогично относительному удлинению при испытаниях с постоянной скоростью изменяется и характеристика, позволяющая судить о пластических свойствах стали, — поперечное сужение, на рисунке 1.23 б. Для поперечного сужения получаются V-образные кривые такого же типа. Попе-

речное сужение меняется больше, поскольку исходные его значения при вязком разрушении выше.

В настоящее время из существующих жаропрочных металлов на железной или никелевой основе для температур выше 500° С не могут быть названы такие материалы, которые при всех возможных условиях работы не проявляли бы в какой-то мере склонности к хрупким разрушениям. Для металлов с деформационной способностью более низкой, чем у стали 1Х18Н9Т, а к таким относятся многие аустенитные стали, склонность к хрупким разрушениям может проявляться еще более резко, что может играть огромную роль очевидно в физических взаимосвязях процесса стружкообразования [124].

# 1.9 Напряженное состояние деформации и разрушение деталей

Информацию о напряжениях, которые вызвали разрушение, можно получить при простом изучении сломанной детали.

Основная плоскость излома, как правило, перпендикулярна максимальным растягивающим напряжениям. Эти типы изломов, называемые в последующем обсуждении I группой изломов, включают скол и другие – хрупкие изломы; вяз-

кие изломы (называемые также изломами, образованными слиянием микропор и ямочными) в условиях плоскодеформированного состояния (в толстых сечениях). В других типах изломов основная поверхность разрушения расположена вдоль плоскостей максимальных касательных напряжений. Эти типы изломов, называемые здесь II группой изломов, включают вязкие изломы при плосконапряженном состоянии (т. е. в тонких сечениях или вблизи свободных поверхностей); изломы, образованные в результате среза; очень ранние стадии усталостных изломов в чистых или относительно чистых металлах; поздние стадии распространения усталостных трещин в некоторых листовых материалах[139].

На рисунке 1.48 схематически изображены направления действия нормальных и касательных напряжений в любой точке на поверхности или внутри цилиндра при одноосном растяжении и сжатии. При каждом типе нагружения показаны типы изломов для вязких и хрупких материалов при непрерывном нагружении. На рисунке 1.48,а) показан цилиндрический пруток при одноосном растяжении. Растягивающие напряжения  $\sigma_1$ , действуют в продольном направлении, а сжимающие напряжения  $\sigma_3$ — в поперечном. Касательные напряжения  $\tau$  направлены под углом 45° к оси образца. В вязких материалах касательные напряжения вызывают значительную деформацию (удлинение и образование шейки), предшествующую разрушению. Разрушение при растяжении начинается вблизи оси образца и распространяется по направлению к поверхности, заканчиваясь конической зоной среза (II группа изломов), обычно примерно под углом 45° к оси. В хрупких материалах излом при однократном нагружении (I группа) приблизительно перпендикулярен к направлению растяжения, причем разрушение проходит с малой пластической деформацией. Распределение упругих напряжений при одноосном растяжении в отсутствие концентраторов равномерно по сечению. Таким образом, разрушение может начаться в любой точке внутри объема с высокими напряжениями [139].

Когда цилиндр нагружен путем одноосного сжатия, как показано на рисунке 1.25, б), в продольном направлении действуют сжимающие напряжения  $\sigma_3$ , а в поперечном — растягивающие напряжения  $\sigma_1$ . Касательные напряжения  $\tau$  действуют под

42



Рисунок 1.25 – Направления действия нормальных и касательных напряжений при одноосном растяжении и сжатии цилиндра:

изломы при однократном нагружении,

а) — растяжение; б) — сжатие;
А — распределение упругих напряжения;
тий; σ<sub>1</sub> — растягивающие напряжения;
σ<sub>3</sub> — сжимающие напряжения; τ<sub>max</sub> — касательные напряжения; Б — вязкий образец; В — хрупкий образец

углом 45° к оси образца, как и при одноосном растяжении. В вязком материале касательные напряжения и в этом случае вызывают значительную пластическую деформацию и обычно не приводят к разрушению. Образец просто укорачивается и становится бочкообразным под совместным влиянием касательных напряжений и сил трения, возникающих при сжатии на торцах образца. Хрупкий материал при одноосном сжатии будет ломаться перпендикулярно направлению действия максимальных растягивающих напряжений. Так как растягивающие напряжения действуют в поперечном направлении, хрупкие разрушения происходят в продольном направлении, т. е. параллельно оси образца. Распределение упругих напряжений при чистом сжатии при отсутствии концентраторов также однородно по сечению. Наиболее вероятно разрушение образца в продольном направлении при увеличении диаметра образца и растяжении внешних волокон.

# 1.10 Силовые нагружения, напряжения, деформации и разрушения в зоне резания

На данный момент проведен ряд экспериментальных работ по исследованию распределения напряжений при различных условиях резания, как на контактных поверхностях, так и внутри режущего клина инструмента.

Для определения напряженного состояния применялся поляризационнооптический метод такими учеными, как Г.С. Андреевым[12], М.Г. Гольдшмидтом [48], М. Окаши и С. Фукуи [153], А.И. Бетанели [37], Т.Н. Лоладзе [75], М.Ф. Полетикой [108], М.Х. Утешевым [136-137].

Для исследования напряженного состояния в модели обрабатываемой детали обычно применяют поляризационно-оптический метод, который требует при экспериментах фиксирования картин полос и системы изоклин, как показано на рисунке 1.26.

Но получение экспериментальных картин процесса резания, а затем их расшифровка возможна только при исследовании напряженного состояния на моделях из оптически активных материалов, что неприемлемо для реальных условий обработки.



Рисунок 1.26 – Изохроматические лини и линии основного напряжения сдвига на модели обрабатываемой детали при свободном резании, главный передний угол  $\gamma$ =60° [153].

Деформированное состояние металла в срезаемом слое приближенно определяли путём обработки шлифованных пластин с нанесённой типографской краской на боковую поверхность координатной сеткой, как представлено на рисунке 1.27.



а — сливная стружка [сплав ХН77ТЮР]; б — суставчатая стружка [сплав ХН77ТЮР]; в — элементная стружка (ВТ2); г — стружка надлома (чугун) Рисунок 1.27 – Корни стружек с координатной сеткой [66]

Профессор Полетика М.Ф. разработал методологию экспериментального определения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента. Для определения нормальной силы N и силы трения F при известных величинах технологических составляющих P<sub>z</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>x</sub>, которые непосредственно измеряют динамометром, необходимо разделить силы на передней и задней поверхностях. Для этого пользуются методом экстраполяции на нулевую толщину среза при постоянной усадке или температуре резания. Длина контакта стружки с резцом определяется по отпечатку износа на резце или пятну контакта на предварительно омедненной поверхности инструмента. Среднюю температуру контакта стружки с резцом измеряли методом естественной термопары. Естественную термопару тарировали в ванне с расплавленным оловом.

К основным контактным характеристикам процесса резания Полетика М.Ф. относит следующие величины:

1) длину контакта стружки с резцом, с;

2) силу трения на передней поверхности, F;

3) удельную силу трения (среднее тангенциальное контактное напряжение):

$$q_F = \frac{F}{bc}; \tag{1.9}$$

4) нормальную силу на передней поверхности N;

5) среднее контактное давление:

$$q_N = \frac{N}{bc} \tag{1.10}$$

6) среднюю температуру контакта  $\theta^{\circ}$ .

Из контактных характеристик только длина и средняя температура контакта могут быть измерены непосредственно. Чтобы определить остальные контактные характеристики необходимо измерить составляющие силы резания. На основании проведенной работы экспериментально выведено уравнение удельной силы трения q<sub>f</sub> от действительного сопротивления разрыву S<sub>k</sub> обрабатываемого материала, как показано на рисунке 1.28:

 $q_f = 0.28 * S_k$ 

$$q_{f}=0,28*S_{k}$$
(1.11)  
 $q_{f}=0,28*S_{k}$ 
(1.11)  
 $q_{f}=0,28*S_{k}$ 
(1.11)  
 $q_{f}=0,28*S_{k}$ 
(1.11)  
 $q_{f}=0,28*S_{k}$ 
(1.11)  
Рисунок 1.28 – Зависимость удельной силы трения  $q_{f}$  от действительной силы трения paspыву  $S_{k}$   
 $q_{N}=\frac{A_{\gamma}}{\zeta^{ml}}$ 
(1.12)

В общем случае зависимость среднего контактного давления от относительной длины контакта может быть представлена в виде графика на рисунке 1.29:



Рисунок 1.29 – Зависимость среднего контактного давления от относительной длины контакта с/а при резании различных материалов ( $\gamma = 10^{\circ}$ )

Профессором Полетика М.Ф. выведены уравнения для определения сил резания касательных и нормальных по передней поверхности:

$$\mathbf{F} = \mathbf{0}, 28\mathbf{S}_{k} \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{l}} \mathbf{u} \mathbf{\pi} \mathbf{u} \qquad \mathbf{F} = \mathbf{0}, 28\mathbf{S}_{k} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{l}} ; \qquad (1.13)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}_{\Box} \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\zeta}^{l(l-m)}$$
или 
$$\mathbf{N} = \mathbf{A}_{\Box} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\zeta}^{l(l-m)} , \qquad (1.14)$$

где  $S_k$  - действительное сопротивление разрыву обрабатываемого материала; a, b, S, t - соответственно толщина и ширина среза, подача и глубина резания;  $\zeta$  - коэффициент усадки стружки;  $A_{\Box}$  и m - коэффициент и показатель степени соответственно, определяемые величиной переднего угла. Так как величина m близка к единице, то показатель степени при усадке невелик. Следовательно, нормальная сила слабо зависит от усадки стружки и является функцией главным образом переднего угла (при S·t = const).

Для определения длины пластического участка с<sub>1</sub> контакта Н.Н. Зорев предложил метод, который заключается в измерении отпечатка на контактной стороне стружки. Чаще всего  $c_1/c \approx 0.5$ .

Н.Г. Абуладзе предложил формулу для определения длины пластического участка контакта по известным толщине среза, усадке стружки и переднему углу резца:

$$c_1 = a[\zeta(1 - tg\gamma) + sec\gamma]$$
(1.15)

Фактическая ширина стружки определяется из выражения:

$$b1 = b \cdot \zeta_b \tag{1.16}$$

На основании изложенного выше можно определять нормальные и касательные контактные напряжения по результатам экспериментальных исследований.

Профессор Розенберг Ю.А. получил теоретические формулы для расчета технологических составляющих сил резания для различных видов обработки [116], [117]. Например, при токарной обработке:



$$P_{z} = C_{nn} \cdot S \cdot t + C_{g\ddot{i}} \cdot \sum l_{xy}; \qquad (1.17)$$

$$R_{xy} = U_{nn} \cdot S \cdot t + U_{3n} \cdot b; \quad (1.18)$$

$$P_{y} = U_{nn} \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi_{np} + U_{3n} \cdot \sum l_{zx};$$
(1.31)
$$P_{x} = U_{nn} \cdot S \cdot t \cdot \sin \varphi_{i\delta} + U_{\varsigma i} \cdot t;$$
(1.19)

Рисунок 1.30 – Схема сил, действую-

#### щих при резании

где С<sub>пп.</sub> и U<sub>пп</sub> - удельные силы на передней поверхности инструмента;

 $C_{3.п.} = C_{\rho}K_{\rho} + C_{h}$  и  $U_{3.n.} = U_{\rho}K_{\rho} + U_{h}$ -удельные силы на задней поверхности инструмента;  $\sum l_{xy}$  и  $\sum l_{zx}$ -проекции суммарной длины рабочих частей режущих кромок на плоскости, перпендикулярные к соответствующим силам;  $\varphi_{np}$  - приведенный главный угол в плане (с учетом условий несвободного и косоугольного резания).

Вышеперечисленные методы для исследования напряженного состояния в зоне резания при нестационарных параметрах резания для реальных условий резания неприменимы.



Рисунок 1.31 – Конечно-элементная сетка в продольном сечении стружки

Наиболее близким к реальным условиям можно считать исследования распределения напряжений в зоне резания с применением метода конечных элементов представленном на рисунке 1.31. [145],[78],[79],[94]

В МКЭ можно учесть физико-механические характеристики

48

обрабатываемого материала и ИТС, как показано на рисунке 1.32, а также распределение температуры в процессе резания, как показано на рисунке 1.33.





Рисунок 1.32 – Картина скорости распределения деформации в стружке [146] Рисунок 1.33 – Распределение температуры в процессе резания [146],[78]

Но в этих работах изучение процесса резания осуществляется по картинам эквивалентных напряжений по Мезису, четвёртой теории прочности пластического разрушения сдвигом. С точки зрения пластического разрушения в теоретической плоскости сдвига, а работы, в которых изучают разрушения  $\sigma_1$  – отры-



вом и σ<sub>3</sub> – сжатием, как показано на рисунке 1.34, должным образом не раскрывают физическую суть изменения вида стружки в процессе резания, не объясняя влияния процесса высокотемпературного охрупчивания на изменение механики процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого материала, получение минимальных энергетических затрат

при превращении обрабатываемого материала в стружку в процессе резания.

Исследования напряжённо деформированного состояния методом 3D моделирования, представленном на рисунке 1.35, [146], [150], [151], является сложным много-



Рисунок 1.35 – Картина скорости распределения менение механики процесса обрадеформации в стружке при фрезеровании зования стружки через разрушение (V=100м/мин, а=1мм, материал режущей части обрабатываемого материала, по-К10, обрабатываемый материал сталь AISI 1045) лучение минимальных энергетических затрат при превращении обрабатываемого материала в стружку в процессе резания.

факторным процессом и требует визуального сечения процесса резания в секущей плоскости стружки, что автоматически приводит исследование к ортогональному резанию.

В перечисленных работах нет объяснения физической сути изменения вида стружки в процессе резания, нет объяснения влияния процесса высокотемпературного охрупчивания на изменение механики процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого материала, получение минимальных энергети-

#### 1.11 Анализ проведенных работ. Цель и задачи исследования

Вопросам исследования процессов образования стружки, влияния скорости резания и температуры на деформации, силы и напряжения в процессе резания, а также определения условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов посвятили свои работы ученые: Бобров В.Ф., Васин С.А., Верещака А.С., Григорьев С.Н., Зорев Н. Н., Клушин М. И., Куфарев Г.Л., Кушнер В.С., Макаров А.Д., Нодельман М.О., Панкин А.В., Подураев В.Н., Полетика М. Ф., Резников А.Н., Розенберг А. М., Розенберг Ю.А., Тахман С.И., Шаламов В. Г., Силин С.С.,

и д.р., а также научная школа Утешева М.Х.: Артамонов Е.В., Некрасов Ю.И., Барбышев Б.В., Ефимович И.А. и д.р.

На основании анализа результатов исследований ученых Тиме М.А., Розенберга А.М., Панкина А.В., Куфарева Г.Л., Нодельмана М.О., ПолетикиМ.Ф., Розенберга Ю.А. и практического опыта автора было установлено, что в зависимости от температурного диапазона вид стружки при обработке деталей из разных материалов во всем температурном диапазоне резания материалов может меняться: элементная; суставчатая; сливная; суставчатая; элементная. Однако как писал, Бобров В.Ф., в настоящее время наиболее подробно изучен процесс сливного стружкообразования. Образование элементной стружки при резании как пластичных, так и хрупких материалов изучено недостаточно.

На основании литературного анализа и собственных исследований [30], сделан вывод, что температура является определяющим фактором во всей взаимосвязи явлений при резании металлов. С этим выводом хорошо коррелируют результаты экспериментальных исследований А.С. Верещаки, В.С. Кушнера, А.Н. Резникова, А.М. Розенберга и А.Н. Еремина, Ю.П. Кабалдина, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, С.С. Силина.

Из литературного анализа следует, что довольно подробно изучены вопросы физики и механики процесса резания металлов.

Изучены существующие подходы к определению и формированию условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка метода формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании, обеспечивающих технически эффективные процессы обработки.

Для достижения изложенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния вопроса по теме диссертации. Сформулировать цель, задачи исследования и научную гипотезу.

2. Разработать установку и подобрать приборы для экспериментальных исследований.

3. Исследовать взаимосвязь механических характеристик обрабатываемых материалов с температурой максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов, коэффициентом сплошности и видом стружки.

4. Исследовать напряжённо - деформированное состояние в стружке при резании металлов методом имитационного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ).

5. Изучить процесс образования стружки через механику разрушения обрабатываемого материала.

6. Исследовать влияние температурно-скоростного фактора на коэффициент сплошности и вид стружки.

**7.** Разработать методику формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путём высокотемпературного охрупчивания при резании.

# Глава 2 Теоретические основы механики разрушения при обработке резанием

В главе изучено научное явление высокотемпературного охрупчивания металлов, зависимости механических характеристик от температуры и вида разрушения при механической обработке резанием, приведены разработанные экспериментальные установки и устройства для исследования механического процесса резания металлов. Описаны результаты экспериментальных исследований.

## 2.1 О механике контактного разрушения

Исследованием механики развития магистральных трещин занимались ученые Колесников Ю. В. [64], Кривоухов В.А. [65-66], Писаренко Г.С.[123], Лебедев А.А. [104], Остафьев В.А. [95], Новиков Н.В. [91], Кушнер В.С. [68-70], Мокрицкий Б.Я. [85-88], Панкин А.В. [96].

Изучение их научных трудов привело к появлению специализированных направлений — математической, вычислительной, экспериментальной, технической механик разрушения, каждое из которых занимается определенной областью теоретического и инженерного знания. На этом фоне по совокупности работ и методологий за последнее время начинает проступать новое направление, занимающееся изучением процесса разрушения поверхности твердого тела. Подобные разрушения связаны с контактными взаимодействиями. Известно, что процессы поверхностного разрушения необходимо рассматривать применительно к анализу напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала с поверхностными трещинами методами механики сплошной среды вместе с соответствующими критериями роста трещины, экспериментами и практическими приложениями.

На базе уточнения физических и механических представлений о механизмах разрушения твердых тел был сформулирован раздел механики деформируемого твердого тела, получивший название механики разрушения [64].

Создание механики разрушения позволило с совершенно новых позиции взглянуть на процессы контактного взаимодействия твердых тел при резании. Известно, что при достижении определенной величины нагрузки в зоне контакта

режущего инструмента с заготовкой происходит разрушение. Особенно часто явление разрушения стружки встречается у твердых материалов, обладающих значительной хрупкостью. Часто оно играет положительную роль при резании.

При контактном взаимодействии твердых тел характерна геометрическая локализация (в области под контактом) всех видов деформации и разрушения, а именно: упругой и пластической, зарождения и распространения трещин. И если обычно механика разрушения занимается развитыми трещинами, то здесь нельзя обходить вниманием вопросы зарождения трещин. Кроме того создаваемые резцом большие сжимающие гидростатические давления приводят для хрупких в условиях нагружения материалов к появлению пластически деформируемых объемов, причём не у вершины трещины, а наоборот, у ее начала, так как трещина растет в растянутых зонах, где пластическое деформирование затруднено в силу положительного среднего напряжения σ<sub>1</sub>. Это дает возможность использовать аппарат линейной механики разрушения для изучения завершающих стадий процесса контактного разрушения. Наконец, в этом процессе не на последнем месте находится вопрос о геометрии (траектории) поверхностей разрушения трещины, поскольку напряженное состояние существенно неоднородно, а траектория трещины определяет размеры фрагментов материала при отколе. Поэтому, все разделы механики сплошной среды, механики материалов и механики разрушения взаимосвязано отражены в задачах контактного взаимодействия.

#### 2.2 Физико-механические основы механики разрушения материалов

Большинство деталей современных машин (например, реактивных двигателей, паровых и газовых турбин) работают при температурах превышающих 1300 °C. Полученные стандартные испытания на разрыв показали, что все механические характеристики металлов существенно изменяются в зависимости от температуры. На рисунке 2.1 представлены диаграммы растяжения углеродистой стали при различных температурах. Также было замечено, что разные механические характеристики имеют общую корреляцию в зависимости от температуры, например, на рисунке 2.2 представлены зависимости предела текучести, временного со-

54

противления и относительного удлинения при разрыве от температуры, экстремумы которых находятся в одном температурном диапазоне. Надо отметить, что на жаропрочных и жаростойких сталях имеется такая же тенденция [104], [123].



Рисунок 2.1 – Диаграммы растяжения стандартных испытаний на разрыв углеродистой стали при различных тем-

#### пературах



Рисунок 2.2 – График зависимости предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения при разрыве от температуры

Из научных трудов профессора Макарова А.Д.[77] известно, что по провалу

пластичности (минимуму относительного сужения или относительного удлинения образца), можно определить оптимальную температуру резания, когда ее изменение также рассматривается в зависимости от температуры.

Известно, что жаропрочные стали и сплавы при определённой температуре и скорости деформации склонны к высокотемпературной хрупкости.[124].

На рисунке 2.3 приведены зависимости характеристик относительного



теристик относительного сужения (ψ) от температуры сталей: ■ - 1Х18Н9Т, ● -40Х, ▲ - 30ХГСА, Δ – 10Х11Н23Т3МР

сужения ( $\psi$ ) от температуры для сталей разных групп обрабатываемости: I – 40X, I – 30ХГСА, I – 12ХНФМА, II – 14Х17Н2, III – 1Х18Н9Т, IV –

## 10X11H23T3MP.

Температура резания  $\theta_0$ , соответствующая условиям максимальной обрабатываемости и минимальной интенсивности износа инструмента h<sub>OI</sub>, удовлетворительно совпадает с температурой  $\theta_{\Pi\Pi}$  испытания, при которой наблюдается провал пластичности жаропрочных сплавов, как показано на рисунке 2.4; совпадение температур  $\theta_0$  и  $\theta_{\Pi\Pi}$ трудно считать случайностью. Возникновение и развитие провалов пластичности у металлов и сплавов объясняют диффузионной гипотезой [77], согласно которой провалы пластичности рассматриваются как результат взаимодействия процессов деформации с превращениями (рекристаллизация, старение,



Рисунок 2.4 – Влияние температуры на h<sub>on</sub> и δ при точении и механических испытаниях жаропрочных сплавов; резец ВК6М; t = 0,50 мм; s = 0,09 мм/об

распад твердого раствора, растворение частиц вторых фаз и др.).

Известно что работа внешней силы Р при растяжении в пределах упругих



Рисунок 2.5 – Диаграмма испытаний растяжения на разрыв

деформаций равна площади диаграммы растяжения в этих же пределах [124].

Очевидно, полная работа внешней силы *P*, затраченная на разрушение бруса, может измеряться полной площадью диаграммы растяжения, изображенной на рисунке 2.5.

Площадь диаграммы растяжения обычно определяется по формуле

$$\dot{A} = \eta D_{\hat{A}} \Delta l_p, \qquad (2.1)$$

где  $D_{A}\Delta l_{p}$  - площадь прямоугольника, представлена на рисунке 2.5;

η — коэффициент заполнения.

Работу, затрачиваемую на деформацию образца, можно разделить на две: работу, затраченную на упругие деформации и работу, затраченную на пластические деформации [124].

Для того чтобы определить потенциальную энергию образца на какой-либо стадии растяжения, как показано на рисунке 2.5, необходимо из соответствующей точки *К* провести линию *KK*<sub>1</sub>, параллельную прямой *OA*, и вертикальную линию *KK*<sub>2</sub>.

Площадь треугольника  $KK_1K_2$  численно равна потенциальной энергии, а остальная площадь диаграммы, взятая от начала координат до линии KK, равна необратимой части работы.

Аналогично понятию удельной потенциальной энергии можно ввести понятие *удельной работы а*, затраченной на разрушение (условно отнесенной к единице первоначального объема). Удельная работа, затраченная на разрушение образца, численно равна площади диаграммы растяжения в осях *σ*, ε:

 $\dot{a} = \eta \sigma_{\hat{A}} \varepsilon_{p}. \tag{2.2}$ 

Величина работы *а*, затрачиваемой на разрыв, зависит от предела прочности, наибольшего удлинения и формы диаграммы растяжения.

Для пластической стали работа, затрачиваемая на разрыв, как правило, бывает больше, чем для хрупкой стали, обладающей большим пределом прочности, Объясняется это тем, что у хрупкой стали удлинение при разрыве бывает значительно меньше.

Из выше сказанного ясно, что резкое снижение пластических свойств жаропрочных сплавов при температуре снижает работу на разрушение обрабатываемого материала.

Используя результаты механических испытаний на растяжение сплава XH 77TЮР (ЭИ437Б), представленных на рисунке 2.6, можно увидеть изменение работы внешней силы через изменение полной площади диаграммы растяжения на разрыв. По графику изменения  $\sigma_i$ =f (e<sub>i</sub>) видно, что при достижении температуры приблизительно 750—800° C физико-механические свойства сплава ЭИ437Б резко изменились.

До температуры 700° С пределы прочности и текучести почти не снижаются.

Из представленных на рисунке 2.6, б) образцов из сплава ЭИ437Б для испытаний на растяжение видно, что образец, разрушенный при температуре 800°, не имеет сколько-нибудь заметной шейки и удлинения. Вполне вероятно, что при высоких температурах происходит охрупчивание металла и разрушение наступает уже при наличии малых упруго-пластических деформаций и работе на разрушение [65].



а – график изменения  $\sigma_i = f(e_i)$  при разных температурах;

б – образцы для механического испытания на растяжение

Рисунок 2.6 – Механические испытания на растяжение сплава ХН 77ТЮР (ЭИ437Б)

На основании анализа графиков изменения полной площади диаграммы растяжения на разрыв  $\sigma_i = f(e_i)$ , и зависимости временного сопротивления разрыву от температуры испытания, представленных на рисунке 2.6, 2.7,[81], [82], [83], автором установлена прямо пропорциональная зависимость при высокотемпературном охрупчивании жаропрочных материалов при начальной температуре (720°C) и температурой охрупчивания (800°C) между отношениями пределов прочности  $\sigma_{B1}$  и  $\sigma_{B2}$  обрабатываемого материала, и отношениями полной площади диаграмм растяжения  $S_{\sigma1}$  и  $S_{\sigma2}$  при обработке резанием этих материалов в соответствующем температурном диапазоне.

$$\frac{\sigma_{\hat{A}1}}{\sigma_{\hat{A}2}} \approx \frac{810 \ \hat{I} \ / \hat{i}\hat{i}^{-2}}{500 \ \hat{I} \ / \hat{i}\hat{i}^{-2}} \approx \frac{S_{\sigma i_1}}{S_{\sigma i_2}} \approx \frac{630 \ \hat{i}\hat{i}^{-2}}{360 \ \hat{i}\hat{i}^{-2}} \approx 1,75$$

По данным зависимостям можно выявить физическую суть определения по-



сплава ХН 77ТЮР (ЭИ437Б)

вышения обрабатываемости жаропрочных материалов по полной площади диаграммы растяжения на разрыв путём определения температурно-скоростного диапазона резания, в котором появляется высокотемпературное охрупчивание.

На основании изложенного выше сформулируем гипотезу о том, что температура максимальной обрабатываемости жаропрочных ме-

таллов на железной и никелевой основе соответствует температуре высокотемпературного охрупчивания, при которой зависимости величин механических характеристик обрабатываемого материала (ψ, δ) от температуры имеют минимальные значения и могут проявляться в процессе резания следующими признаками:

1- минимальным значением силы резания P<sub>Z</sub> и потребляемой мощностью при резании;

2- минимальным значением относительного поверхностного износа по задней поверхности режущего лезвия инструмента h<sub>OII3 min</sub>, обуславливающим максимальную работоспособность твердосплавного режущего инструмента.

3- изменением вида стружки из сливной в элементную;

4 - уменьшением коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub> до минимальных значений.

#### 2.3 Экспериментальные установка, устройство, оборудование и приборы

Дано описание разработанной экспериментальной установки и устройства для измерения сил резания и температуры в процессе резания, комплекса электронных оптических приборов для определения относительного износа по задней поверхности, методики проведения экспериментов и обработки результатов эксперимента[16],[25].

Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка оригинальной конструкции, как показано на рисунках 2.8, 2.9, позволяющая формировать условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов по зависимости изменения вида стружки от температуры резания.

Установка представляет собой технологический комплекс, состоящий из токарно – винторезного станка, на суппорте которого установлено устройство для измерения сил резания и температуры в процессе резания. Фиксирование параметров процесса резания осуществлялось с помощью приборного щита динамометра и цифрового комбинированного измерительного прибора.

Устройство для измерения сил резания и температуры в процессе резания состоит из динамометра УДМ – 1200 с закрепленным в нем резцом – естественной термопарой из сплава ВК8, площадки основания, закрепленной на ней поворотной порталой с пирометром. Регистрация параметров процесса резания осуществлялась с помощью цифровой видеокамеры.

Режимные условия эксперимента формировались так, чтобы охватить весь температурно-скоростной диапазон, начиная с температуры 200°С и заканчивая температурой потери формоустойчивости режущего клина из ВК8, равной  $\theta$ =1100°С при подаче S=0,4мм/об. Варьируемым параметром являлась скорость резания V=12 – 200 м/мин. В процессе эксперимента измерялись температура резания, силы резания и определялись усадка и вид стружки. Определение величины поверхностного износа по задней поверхности режущих элементов производилось с помощью комплекса электронных оптического USB окуляра 640х480 пикселей) [1], [2], [23], [24].

В качестве режущего инструмента – токарные резцы со сменными многогранными пластинами из твердого сплава ВК8 с геометрией  $\gamma=10^{\circ}, \alpha=10^{\circ}, \lambda=0^{\circ}, \phi=45^{\circ}.$ 

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием ПК и программ «Microsoft Excel», «КОМПАС – 3D V13»

Приборы и оборудование, применяемые в процессе эксперимента

- 1. Универсальный динамометр УДМ-1000.
- 2. Образцовый динамометр ДОСМ-3-1 с ценой деления (15,4 Н)
- 3. Нагрузочная рама.
- 4. Нагрузочная "рыбка" и комплект ключей.
- 5. Токарно-винторезный станок 1К62.
- 6. Модель токарного резца.

7. Естественная термопара резец ВК8, ( $\gamma = +10^{\circ}, \alpha = 4^{\circ}, \varphi = 45^{\circ}, \varphi = 45^{\circ}, \beta = 45^{\circ}, \lambda = 0^{\circ}$ ) деталь сталь: 12X18H9T.

8. Инфракрасный пирометр.



Рисунок 2.8 – Экспериментальная установка

цессе резания, 4 – приборный щит динамометра, 5 – цифровой комбинированный измерительный прибор, 6 – элек-1 – токарно – винторезный станок, 2 – динамометр, 3 – устройство для измерения сил резания и температуры в протронный усилитель



ра, 7 – милливольтметр, 8 – обрабатываемая деталь,

1 – динамометр, 2 – площадка-основание, 3 - поворотная портала, 4 – резец, 5 – пирометр, 6 – цифровая видеокаме-



5



задней поверхности СМП и коэффициента сплошности

Рисунок 2.10 – Комплекс электронных оптических приборов для определения относительного износа по

4 - поворотный столик

І – персональный компьютер; 2 – оптический USB окуляр 640х480 пикселей; 3 – микроскоп МГ (х 3,7)

#### 2.4 Тарировка динамометра и построение тарировочного графика

При тарировке динамометра устанавливается зависимость между показаниями регистрирующих приборов и фактической величиной прикладываемой нагрузки, действующей на резец. Тарировка осуществляется последовательным статическим нагружением динамометра эталонными силами в направлении действия каждой из составляющих силы резания P<sub>z</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>x</sub>. [118]

Эталонная нагрузка прикладывается посредством образцового динамометра 4 ДОСМ-3-1. Показания образцового динамометра отсчитываются по шкале индикатора в долях мм и затем переводятся в Н по паспортным данным. Соответствующие изменяющейся нагрузке изменения силы тока в электрической цепи динамометра фиксируются миллиамперметрами (для каждой составляющей) [75]. Их зависимость отображается графически (тарировочный график).

Методика тарирования динамометра состоит из следующих основных этапов:

- нагрузочная рамка устанавливается на токарно-винторезном станке (1К62), рама закрепляется в патроне станка и поджимается вращающимся центром задней бабки, вертикальная стойка рамы (ось z) выставляется строго вертикально, т.е. перпендикулярно к оси вращения шпинделя и оси оправки;

- образцовый динамометр ДОСМ-3-1 устанавливается между упорной частью вертикальной стойки рамы и нагрузочной "рыбкой" для нагружения составляющей силы резания P<sub>z</sub>;

- нагружение и разгружение динамометра осуществляется в соответствии с таблицей 2.1, производится нагрузочной "рыбкой" до максимального отклонения стрелки миллиамперметра по 15 делений шкалы индикатора образцового динамометра, перед началом измерений необходимо выставить ноль на шкалах миллиамперметра и индикатора часового типа;

- производится нагружение и разгружение эталонными силами составляющей P<sub>y</sub> и составляющей P<sub>x</sub>, аналогично составляющей P<sub>z</sub>, результаты замеров записываются в таблице 2.1,

|          | Поте                                    | 2011110 |                     |     |                 |                     |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
|----------|---|---------|---------------------|-----|-----------------|---------------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----------------|-------|
| №<br>п/п | показания<br>образцового<br>динамометра |         | Р <sub>z</sub> , мА |     |                 | Р <sub>у</sub> , мА |     |     | Р <sub>х</sub> , мА |     |     |     |                 |       |
|          | деле-<br>ния                            | Н       | Η                   | Р   | I <sub>cp</sub> | ΔΙ                  | Н   | Р   | I <sub>cp</sub>     | ΔI  | Н   | Р   | I <sub>cp</sub> | ΔΙ    |
| 1        | 0                                       | 0       | 25                  | 25  | 25              | 0                   | 25  | 20  | 22,5                | 0   | 25  | 20  | 22,5            | 0     |
| 2        | 15                                      | 24,6    | 60                  | 55  | 57,5            | 32,5                | 230 | 215 | 222,5               | 200 | 145 | 125 | 135             | 112,5 |
| 3        | 30                                      | 49,2    | 95                  | 90  | 92,5            | 67,5                | 430 | 415 | 422,5               | 400 | 260 | 240 | 250             | 227,5 |
| 4        | 45                                      | 73,8    | 125                 | 125 | 125             | 100                 |     |     |                     |     | 320 | 355 | 337,5           | 315   |
| 5        | 60                                      | 98,4    | 165                 | 160 | 162,5           | 137,5               |     |     |                     |     | 485 | 485 | 485             | 462,5 |
| 6        | 75                                      | 123     | 200                 | 195 | 185,5           | 172,5               |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 7        | 90                                      | 147,6   | 260                 | 250 | 245             | 220                 |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 8        | 105                                     | 172,2   | 265                 | 260 | 262,5           | 257,5               |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 9        | 120                                     | 196,8   | 300                 | 295 | 297,5           | 272,5               |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 10       | 135                                     | 221,4   | 360                 | 330 | 345             | 320                 |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 11       | 150                                     | 246     | 370                 | 365 | 367,5           | 342,5               |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 12       | 165                                     | 270,6   | 405                 | 405 | 405             | 380                 |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 13       | 180                                     | 295,2   | 440                 | 435 | 437,5           | 412,5               |     |     |                     |     |     |     |                 |       |
| 14       | 195                                     | 319,8   | 445                 | 475 | 475             | 450                 |     |     |                     |     |     |     |                 |       |

Таблица 2.1- Результаты замеров тарировки динамометра

где: *I*<sub>*ñð*</sub> среднее значение силы тока;

Н – показания миллиамперметра при нагружении динамометра, мА;

Р – показания миллиамперметра при разгружении динамометра, мА;

 $\Delta I$  - действительное значение силы тока;

по результатам опытов строится тарировочный график. На ось ординат наносится шкала силы резания (показания образцового динамометра ДОСМ-3-1 в Н), а на ось абцисс шкала показаний миллиамперметра в мА, на эти оси наносятся опытные точки, полученные при нагружении и разгружении динамометра, по которым строится общая, усредненная зависимость (прямая или кривая линия в зависимости от характеристик динамометра) [17].



Рисунок 2.11 – Тарировочный график динамометра

### 2.5 Метод ускоренного тарирования естественной термопары

При конструировании специальных термопар для исследования процесса резания необходимо исключить появление паразитных термотоков, искажающих результаты измерения [1],[2]. Для этого стараются вывести из зоны нагрева все промежуточные «спаи» в электрической цепи термопары [33],[115].

Схема лабораторной установки для ускоренного статического тарирования термопары представлена на рисунке 2.10. Естественная термопара, тарируемая на установке, составлена из заготовки 7 из стали 12Х18Н9Т и токарного резца 5 из ВК8. Нагревание естественной тарируемой термопары осуществляется с помощью температуры резания, увеличивая скорость резания с 10 до 100 м/мин. Температура нагрева контролируется посредством пирометра 4, который устанавли-

вается на поворотном механизме 2, ориентируясь так, чтобы пирометр 3 находился: в первом случае - над вершиной токарного резца естественной термопары 5; во втором случае - с торца обрабатываемой металлической детали 7.

Для измерения ТЭДС клеммы милливольтметра подключены соответственно к токосъемнику и токарному резцу 5.

При увеличении скорости резания увеличивается температура резания, с каждым изменением скорости резания температура резания фиксируется в таблицу 2.4.

Пирометр 4 – инфракрасный термометр "КМ" предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. "КМ" применяется для контроля теплового режима производственного оборудования (электрораспределительных устройств, промышленных печей, двигателей и т.п.), а также для точного измерения температуры в технологических процессах металлургии, машиностроения, нефтепереработки, нефтехимии и т.д.

Принцип работы пирометра состоит в том, что "КМ" преобразует энергию инфракрасного излучения, излучаемую поверхностью объекта, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные. В "КМ" предусмотрена автоматическая компенсация температуры окружающей среды.

Цифровая установка излучательной способности объектов (Е) по справочной таблице 2.3 обеспечивает необходимую точность измерения [100],[98].

Таблица 2.3 - Типичные значения излучательной способности материалов относительно абсолютно черного тела.

| Ma       | териал        | 3         |                 | Материал        | 3         |
|----------|---------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
|          | Полированный  | 0,04-0,06 |                 | полированная    | 0,52-0,56 |
| Алюминии | Окисленный    | 0,2-0,3   | Сталь           | лист. прокатная | 0,56      |
|          | Полированная  | 0,02      |                 | окисленная      | 0,8       |
| Медь     | Окисленная    | 0,6-0,8   | Чугун окисленый |                 | 0,54-0,78 |
|          | Расплавленная | 0,13-0,15 | Керамика        |                 | 0,95      |

Поле зрения – измеряемый диаметр объекта, с поверхности которого "КМ" принимает энергию инфракрасного излучения. Измеряемый диаметр объекта определяется показателем визирования и зависит от расстояния до инфракрасного термометра: измеряемый диаметр объекта = расстояние до объекта / показатель визирования.

Минимальный измеряемый диаметр - наименьший диаметр объекта, который может быть измерен при данном фокусном расстоянии и размере приемника. Не менее 90% энергии инфракрасного излучения поверхности этого диаметра принимается "КМ". При увеличении или уменьшении расстояния измеряемый диаметр возрастает. При приближении к объекту вплотную измеряемый диаметр увеличивается до размеров входного зрачка прибора.



Рисунок 2.12 – Диаграмма поля зрения пирометра Точность измерения не зависит от расстояния до тех пор, пока размер объекта больше измеряемого диаметра. Индицируемая "КМ" температура будет не верна, если размер объекта меньше поля зрения. Так как объект, температура которого измеряется, не заполняет все поле

зрения, прибор принимает излучение от других объектов окружающей среды, которое оказывает влияние на точность измерения [18], [20], [33], [42].

В процессе обработки на высоких скоростях резания возникают вибрации. Это обуславливается, отчасти, элементной структурой стружки и интенсивным износом режущего инструмента. А так как пирометр имеет установку на измерение определённого температурного диапазона (например от 300°C до 1100°), то резкое движение луча в процессе эксперимента может привести к измерению элементов станка с температурой  $\approx 20$ °C, резкое изменение температуры ведёт к выдаче пирометром ошибки и сигнализации выхода температуры за диапазон из-





# а) с вертикальным расположением пирометра б) с горизонтальным расположением пирометра Рисунок 2.13 – Схема лабораторной установки для тарирования искусствен-

#### ной термопары

Поэтому весьма большое значение при организации эксперимента имеет правильно спроектированная лабораторная установка для тарирования искусственной термопары и отвечающая паспортным требованиям пирометра, как показано на рисунке 2.13.

На основании этого можно сделать вывод, что физический смысл экспериментального метода ускоренного статического тарирования естественной термопары заключается в моделировании процесса взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов при высоких температурах и в результате тарирования, устанавливается графическая зависимость между температурой контакта и термоэлектродвижущей силой [19], [21], [99], [100], 101.

Методика выполнения тарировки искусственной термопары состоит из следующих основных этапов:

1. Закрепление заготовки (1Х18Н9Т) в патроне станка 1К62 и поджатие центром (вращающимся) задней бабки.

2. Закрепление резца естественной термопары в резцедержателе (сплав ВК8).

70

3. Замер диаметра заготовки и геометрических параметров резца ( $\alpha, \gamma, \lambda, \phi, \phi_1$ ).

4. Установка подачи S мм/об и произведение точения заготовки на проход с различными скоростями, как показано в таблице 2.4.

5. Производится точение участками по 50 мм, одновременно снимая показания приборов милливольтметра (мV)и пирометра °С для каждой скорости резания V. Результаты заносят в таблицу 2.4.

6. Проведение серии опытов с вертикальным и торцевым расположением пирометра.

7. После каждого опыта производится сбор всей стружки в конверт с надписью режимов резания.

8. По результатам опытов строится график зависимости  $E = f(\theta)$  для торцевого расположения пирометра, как показано на рисунке 2.14. и заносится в таблицу 2.4.

Определение величины поверхностного износа по задней поверхности режущих элементов производилось с помощью комплекса электронных оптических приборов, показанного на рисунке 2.10.

Таблица 2.4 – Тарированных данных естественной термопары (твердый сплав ВК8) и сталей разных групп обрабатываемости: (I - IV) I – 40X, I – 30ХГСА, I – 12ХНФМА, II – 14Х17Н2, III – 1Х18Н9Т, IV – 10Х11Н23Т3МР.

| 30XГСА                              |  |  |                              |   |   |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|------------------------------|---|---|--|--|--|
| № п/п                               | n,об/мин                                     | V, м/мин                                 | S, мм/об                     | D, мм   | θ,C°  | E, mV                                  |  |  |
| 1                                   | 160  | 26,2                                     |                              | 52,2  | 526   | 4                                      |  |  |
| 2                                   | 315  | 53,6                                     |                              | 54,2  | 567   | 5,4                                    |  |  |
| 3                                   | 500         88,5           630         113,5 |  | 0,43                         | 56,4  | 660   | 6                                      |  |  |
| 4                                   |  |  |                              | 57,4  | 750   | 7,7                                    |  |  |
| 5                                   | 800  | 127                                      |                              | 50,6  | 820   | 8                                      |  |  |
| 14X17H2                             |  |  |                              |   |   |  |  |  |
| № п/п                               | n.об/мин                                     | V м/мин                                  | S MM/OD                      |   | $A C^{\circ}$   | EmV                                    |  |  |
|                                     | ,  | <b>v</b> , <b>w</b> , <b>w</b>           | $\mathbf{S}, \mathbf{WW}/00$ | D, MM   | 0,C   | E, III V                               |  |  |
| 1                                   | 250  | 41,6                                     | 5, MM/00                     | 53  | 650   | E, III v<br>7                          |  |  |
| 1 2                                 | 250<br>315                                   | 41,6<br>54,4                             | 0.42                         | 53<br>55  | 650<br>680  | 7<br>7,5                               |  |  |
| 1<br>2<br>3                         | 250<br>315<br>630                            | 41,6<br>54,4<br>115,9                    | 0,43                         | 53           55           58,6                                    | 650           680           780                         | E, mv<br>7<br>7,5<br>8,6               |  |  |
| 1<br>2<br>3<br>4                    | 250<br>315<br>630<br>800                     | 41,6<br>54,4<br>115,9<br>143             | 0,43                         | 53           55           58,6           57                       | 650           680           780           830           | 2, mv<br>7<br>7,5<br>8,6<br>9          |  |  |
| 1<br>2<br>3<br>4<br>1X18H9          | 250<br>315<br>630<br>800<br>T                | 41,6<br>54,4<br>115,9<br>143             | 0,43                         | 53       55       58,6       57                                   | 650<br>680<br>780<br>830                                | E, mv<br>7<br>7,5<br>8,6<br>9          |  |  |
| 1<br>2<br>3<br>4<br>1Х18Н9<br>№ п/п | 250<br>315<br>630<br>800<br>Т<br>п,об/мин    | 41,6<br>54,4<br>115,9<br>143<br>V, м/мин | 0,43<br>S, мм/об             | D, MM         53         55         58,6         57         D, MM | 0,C       650       680       780       830       θ, C° | E, mV<br>7<br>7,5<br>8,6<br>9<br>E, mV |  |  |

| 2                       | 80         | 50       |          |       | 600   | 6,9   |  |  |
|-------------------------|------------|----------|----------|-------|-------|-------|--|--|
| 3                       | 125        | 77       |          |       | 705   | 9,9   |  |  |
| 4                       | 160        | 100      |          |       | 750   | 10,5  |  |  |
| 5                       | 200        | 120      |          |       | 780   | 11,7  |  |  |
| 6                       | 250        | 154      |          |       | 800   | 12,5  |  |  |
| 7                       | 315        | 194      |          |       | 830   | 12,9  |  |  |
| 10X11H                  | 23ТЗМР (ЭІ | 133ВД)   |          |       |       |       |  |  |
| № п/п                   | n,об/мин   | V, м/мин | S, мм/об | D, мм | θ, C° | E, mV |  |  |
| 1                       | 25         | 5,2      |          | 67    | 560   | 4     |  |  |
| 2                       | 100        | 22,2     | 0.42     | 71    | 600   | 5,2   |  |  |
| 3                       | 160        | 34       | 0,45     | 69    | 700   | 5,8   |  |  |
| 4                       | 250        | 50       |          | 63    | 760   | 6,5   |  |  |
| 5                       | 300        | 57       |          | 61    | 790   | 7     |  |  |
| 6                       | 400        | 76,6     |          | 61    | 860   | 7,6   |  |  |
| 7                       | 630        | 112      |          | 57    | 950   | 8     |  |  |
| 8                       | 800        | 150      |          | 59    | 1040  | 9     |  |  |
| 12Х2НВФМА               |            |          |          |       |       |       |  |  |
| № п/п                   | n,об/мин   | V, м/мин | S, мм/об | D, мм | θ, C° | E, mV |  |  |
| 1                       | 80         | 20       |          |       | 550   | 15,7  |  |  |
| 2                       | 160        | 40       | 0,52     | 80    | 600   | 16    |  |  |
| 3                       | 250        | 62,8     |          |       | 680   | 18,2  |  |  |
| Продолжение таблицы 2.4 |            |          |          |       |       |       |  |  |
| 4                       | 315        | 80       |          |       | 730   | 18,4  |  |  |
| 5                       | 400        | 100      |          |       | 780   | 19    |  |  |
| 6                       | 630        | 158      |          |       | 800   | 19,2  |  |  |
| 7                       | 800        | 200      |          |       | 870   | 19,5  |  |  |

Продолжение таблицы 2.4

В качестве режущего инструмента использовались токарные резцы со сменными многогранными пластинами из твердого сплава ВК8 с геометрией γ=10°,  $\alpha = 10^{\circ}, \lambda = 0^{\circ}, \phi = 45^{\circ}.$


# 2.6 Результаты экспериментальных исследований зависимости величины фаски износа по задней поверхности от температуры

Для определения размерной стойкости инструмента мы воспользовались методикой профессора А.Д. Макарова по определению относительного поверхностного износа по задней поверхности.

Относительный поверхностный износ является универсальной характеристикой размерной стойкости, так как он позволяет объективно сопоставлять режущие свойства различных инструментальных материалов при любых сочетаниях подач и скоростей резания и разных критериях затупления [77].

$$h_{\tilde{l}\tilde{l}c} = \frac{h_{c\hat{A}} \cdot 100}{l} \, i\hat{e}i \, /10^3 \tilde{n}i^2 \qquad (2.6)$$

где: h<sub>3B</sub> – ширина фаски износа по задней поверхности, мкм

1 – длина пути резания, м

Результаты экспериментов с износом по задней поверхности при обработке различных сталей представлены в таблицах 2.5-2.8.

Обработка данных осуществлялась с использованием ПК и программы «Microsoft Excel»

Таблица 2.5 – Результаты экспериментов с износом по задней поверхности при обработке стали 10Х11Н23Т3МР

| №<br>п.п. | Микрофотографии износа разрунения<br>пластин | $\frac{h_{_{OII3}}}{MKM/10^3 cm^2}$ | №<br>п.п. | Микрофотографии износа разрунения<br>пластин | $\frac{h_{_{OH3}}}{MKM/10^3 cM^2}$ |
|-----------|--|-------------------------------------|-----------|--|------------------------------------|
| 1         | 0,025 MM                                     | 277                                 | 2         |  | 318                                |
|           |  |                                     |           |  |                                    |
| 3         | 0,025 MM                                     | 1002                                | 4         |  | 1846                               |

Таблица 2.6 – Результаты экспериментов с износом по задней поверхности при обработке сталей разных групп обрабатываемости, сталь 1X18H9T

| №<br>п.п. | Микрофотографии износа и разру-<br>шения пластин | $h_{0II3} \atop {}^{3} h_{MKM/10} {}^{3} cM^2$ | №<br>п.п. | Микрофотографии износа и разру-<br>шения пластин | $h_{_{0II3}}^{} h_{_{0II3}}^{} h_{_{MKM}/10}^{3} c_{M}^{2}$ |
|-----------|--|--|-----------|--|---|
| 1         | 0.025 MM   | 100  | 2         | 0,025 MM   | 78  |
| 3         | 0,025 MM   | 75   | 4         | 0.025 MM   | 78  |
| 5         | 0,025 MM   | 95   | 6         | 0,025 MM   | 200   |
| 7         | 0,025 MM   | 440  | 8         |  | 1000  |

Таблица 2.7 – Результаты экспериментов с износом по задней поверхности при обработке сталей разных групп обрабатываемости, сталь 14X17H2 S=0.43



Таблица 2.8 – Результаты экспериментов с износом по задней поверхности при обработке сталей разных групп обрабатываемости, сталь 30ХГСА

| №<br>п.п. | Микрофотографии износа разрунения<br>пластин | $\frac{h_{o \pi 3}}{MKM/10^3 c M^2}$ | <b>№</b><br>п.п. | Микрофотографии износа разрунения<br>пластин | $\frac{h_{on3}}{\text{MKM}/10^3\text{cm}^2}$ |
|-----------|--|--------------------------------------|------------------|--|--|
| 1         | 0.025 MM                                     | 136                                  | 2                |  | 142  |



# 2.7 Результаты экспериментальных исследований характеристик механики процесса резания в зависимости от температурно – скоростного фактора

На образцах из стали марок 1Х18Н9Т, 10Х11Н23Т3МР, 30ХГСА, 14Х17Н2, 12Х2НВФМА были проведены испытания обрабатываемости при точении с различной скоростью резания. В процессе резания было изучено влияние температуры резания на основные параметры процесса. Зависимости  $\psi$ =f( $\theta^{\circ}$ ),  $\delta$ =f( $\theta^{\circ}$ ) и h<sub>опз</sub> = ( $\theta^{\circ}$ ), L = ( $\theta^{\circ}$ ) имеют экстремальный характер при температуре резания, соответствующей условиям максимальной обрабатываемости, минимуму интенсивности износа инструмента, максимуму пути резания, удовлетворительно совпадают с температурой  $\theta_{\Pi\Pi}$  испытания, при которой наблюдается высокотемпературное охрупчивание (провал пластичности) жаропрочных сплавов, как показано на рисунках 2.15. - 2.19., совпадение температур  $\theta_{O}$  и  $\theta_{\Pi\Pi}$  трудно считать случайностью.

| Сталь ЭП33ВД (10Х11Н23Т3МР); подача S=0,43м/мин, t=1,5мм; |            |                  |                   |   |                    |                        |           |      |
|---|------------|------------------|-------------------|---|--------------------|------------------------|-----------|------|
|   |            | Резец            | ВК8 γ=1           | $10^{\circ}, \alpha = 10^{\circ}, \lambda = 0$            | °, φ=45            | $^{\circ}, \phi_1 = 4$ | 5°        |      |
| №<br>п.п.   | V<br>м/мин | θ°C              | $P_Z$             | h <sub>опз</sub><br>мкм/10 <sup>3</sup> ∙см <sup>2</sup>  | L<br>M             | Ŀζ                     | θ°C       | Ψ    |
| 1   | 5,2        | 560              | 2547              | 371,6   | 2200               | 4,5                    | 600       | 63   |
| 2   | 22,2       | 600              | 2484              | 350,7   | 2800               | 4,6                    | 000       | 05   |
| 3   | 34,6       | 700              | 2088              | 276,4   | 2900               | 3,3                    | 760       | 50   |
| 4   | 49,4       | 760              | 2160              | 310,5   | 3100               | 3,4                    | 700       | 59   |
| 5   | 57,4       | 790              | 2196              | 598,6   | 2000               | 3,4                    | 800       | 69   |
| 6   | 76,6       | 860              | 2160              | 1041  | 1300               | 3,4                    | 800       | 09   |
| 7   | 112,7      | 950              | 2142              | 1160,5  | 900                | 3,3                    | 900       | 75   |
|   |            | Сталь 1<br>Резец | X18H9T<br>ΒK8 γ=1 | ; подача S=0,4<br>10°, α=10°, λ=0                         | 3м/мин<br>°, φ=45  | t, t=1,5               | мм;<br>5° |      |
| №<br>п.п.   | V<br>м/мин | θ°C              | Pz                | h <sub>опз</sub><br>мкм/10 <sup>3</sup> ·см <sup>2</sup>  | L<br>M             | ير                     | θ°C       | Ψ    |
| 1   | 30         | 550              | 1728              | 100   | 2800               | 1,3                    | 500       | 68   |
| 2   | 50         | 600              | 1368              | 78  | 3000               | 1,17                   | 550       | 74   |
| 3   | 77         | 706              | 1404              | 75  | 3200               | 1,2                    | 600       | 73   |
| 4   | 100        | 750              | 1296              | 78  | 3000               | 1,1                    | 650       | 70   |
| 5   | 120        | 780              | 1188              | 100   | 2300               | 1                      | 700       | 57   |
| 6   | 154        | 830              | 1188              | 200   | 900                | 1                      | 800       | 57   |
| 7   | 194        | 900              | 1188              | 440   | 800                | 1                      | 900       | 89,7 |
|   |            | Сталь 1<br>Резец | 4X17H2<br>ΒK8 γ=1 | ; подача S=0,4<br>10°, α=10°, λ=0                         | 3м/мин<br>°, φ=45' | t=1,51                 | мм;<br>5° |      |
| №<br>п.п.   | V<br>м/мин | θ°C              | Pz                | h <sub>опз</sub><br>мкм/10 <sup>3</sup> · см <sup>2</sup> | L<br>M             | ž                      | θ°C       | Ψ    |
| 1   | 41,6       | 653              | 2296              | 180   | 2150               | 3,45                   |           |      |
| 2   | 54,4       | 690              | 2440              | 240   | 3300               | 3,39                   |           |      |
| 3   | 95         | 730              | 1656              | 185   | 7800               | 3                      |           |      |

Таблица 2.9 – Результаты испытаний обрабатываемости резанием

| 4    | 116  | 770   | 669     | 160                            | 9950    | 2,79                  |           |    |  |  |
|------|--|-------|---------|--------------------------------|---------|-----------------------|-----------|----|--|--|
| 5    | 143  | 850   | 820     | 300                            | 4800    | 2,83                  |           |    |  |  |
|      | Сталь 30ХГСА; подача S=0,43м/мин, t=1,5мм; |       |         |                                |         |                       |           |    |  |  |
|      |  | Резец | BK8 γ=1 | 10°, α=10°, λ=0                | °, φ=45 | ´, φ <sub>1</sub> =4: | $D^\circ$ |    |  |  |
| N⁰   | V  | θ°C   | Pz      | h <sub>опз</sub>               | L       | ٤                     | θ°C       | Ψ  |  |  |
| П.П. | М/МИН                                      |       | 2       | $MKM/10^{\circ} \cdot CM^{-1}$ | M       | 5                     |           | 1  |  |  |
| 1    | 26,2                                       | 526   | 2520    | 136                            | 2700    | 4,7                   | 500       | 83 |  |  |
| 2    | 53,6                                       | 567   | 2862    | 142                            | 4300    | 5,3                   | 550       | 84 |  |  |
| 3    | 88,5                                       | 660   | 2502    | 177                            | 6500    | 4,3                   | 700       | 50 |  |  |
| 4    | 113,5                                      | 750   | 1512    | 154                            | 7100    | 3,7                   | 800       | 74 |  |  |
| 5    | 127  | 860   | 1584    | 225                            | 3200    | 4                     | 900       | 90 |  |  |

Наименышая интенсивность износа, представленная в таблицах 2.5 – 2.8, при точении деталей из сталей 40Х, 1Х18Н9Т, 12Х2НВФМА, 14Х17Н2, 10Х11Н23Т3МР, 30ХГСА наблюдается при таких средних температурах резания, которые удовлетворительно совпадают с температурами высокотемпературного охрупчивания (δ, ψ), представленная на рисунке 2.3. В связи с этим появился интерес сопоставить значения минимального относительного износа с температурами, при которых возникает высокотемпературное охрупчивание, как показано на рисунках 2.15 – 2.19.

Возникновение и развитие провалов пластичности у металлов и сплавов объясняют диффузионной гипотезой [34], согласно которой провалы пластичности рассматриваются как результат взаимодействия процессов деформации с превращениями (рекристаллизация, старение, распад твердого раствора, растворение частиц вторых фаз и др.).

На основании результатов исследования установлено, что температурный диапазон, в котором величина относительного сужения металла  $\psi$  имеет минимальное значение, то есть требует минимальных энергетических затрат на превращение обрабатываемого материала в стружку и соответствует условиям максимальной обрабатываемости материалов. Таким образом доказаны 2 и 3 признаки гипотезы.







Рисунок 2.16 – Зависимость относительного сужения (ψ), коэффициента усадки стружки (ξ), относительного поверхности стного износа по задней поверхности (h<sub>опз</sub>), силы резания (Р<sub>z</sub>), температуры резания (Θ) при обработке резцами с СМП из ИТС ВК8 и постоянными S=0,43м/мин, t=1,5мм стали 10X11H23T3MP





#### t=1,5мм стали 30ХГСА



Рисунок 2.18 – Зависимость температуры резания (Θ), относительного поверхностного износа по задней поверхности (h<sub>опз</sub>), силы резания (P<sub>z</sub>), коэффициента усадки стружки (ξ), пути резания (L) от скорости резания (V) при обработке резцами с СМП из ИТС ВК8 и постоянными S=0,43м/мин,

## t=1,5мм стали 14Х17Н2

Опасность столь значительного падения пластичности возникает при проявлении высокотемпературного охрупчивания и при интенсивном развитии межзеренного разрушения в условиях высоких температур [72].

Резкое снижение пластических свойств жаропрочных сплавов при температуре

0<sub>ПЦ</sub> связано с переходом от внутризеренного скольжения, наблюдаемого при низких и высоких температурах, к межзёренному скольжению при температурах 0<sub>ПП</sub>,



Рисунок 2.19 – Графики зависимости силы резания P<sub>Z</sub>, коэффициента усадки стружки ξ, температуры резания θ°С, относительного износа по задней поверхности h<sub>опз</sub> (мм) от скорости резания V(м/мин)

при обработке стали 12Х2НВФМА

так как в зоне этих температур прочность границ зерен становится существенно ниже прочности самих зерен [77].

На основании результатов исследования Макарова А. Д. по оптимизации режимов резания [77]установленная температура резания 760°С является обеспечивающей условия максимальной обрабатываемости материалов при точении стали 1Х18Н9Т резцом из ВК8, что соответствует условию максимальной работоспособности инструментального твердого сплава ВК8 [15].

Анализ результатов эксперимента установил взаимосвязь величины минимального относительного сужения материала, вида и длины стружки обрабатываемого материала при разных скоростях и температурах резания, доказывая физическую природу механики разрушения отрывом с

образованием элементной стружки при механической обработке резанием, что доказывает 3 признак гипотезы.

### 2.8 Выводы

1. На основе новой научной идеи использования отрицательного эффекта высокотемпературной хрупкости жаропрочных материалов в изделиях из жаропрочных материалов в качестве положительного эффекта сформулирована и на основании результатов экспериментов доказана гипотеза о том, что температура максимальной обрабатываемости жаропрочных металлов на железной и никелевой основе соответствует температуре высокотемпературного охрупчивания, при которой зависимости величин механических характеристик обрабатываемого материала (ψ, δ) от температуры имеют минимальные значения и могут проявляться в процессе резания следующими признаками:

1- минимальным значением силы резания P<sub>Z</sub> и потребляемой мощностью при резании;

2- минимальным значением относительного поверхностного износа по задней поверхности режущего лезвия инструмента h<sub>OII3min</sub>, обуславливающим максимальную обрабатываемость материалов;

3- изменением вида стружки из сливной в элементную;

4- уменьшением коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub> до минимальных значений.

2. Приведены разработанные экспериментальные установки и устройства для исследования механики процесса резания металлов

3. Произведена тарировка естественной термопары (твердый сплав ВК8) и сталей: 40X, 1X18H9T, 12X2HBФMA, 14X17H2, 10X11H23T3MP, 30XГСА.

4. Установлено, что температурный диапазон, в котором величина относительного сужения металла  $\psi$  имеет минимальное значение, обеспечивает минимальные силы резания  $P_Z$  и коэффициент усадки стружки  $\xi$ ,т.е. минимальную потребляемую мощность при резании и минимальное значение износа по задней поверхности режущего лезвия инструмента  $h_{OII3min}$ , обуславливающих максимальную обрабатываемость материала, соответственно максимальную работоспособность твердосплавного режущего инструмента. Таким образом, доказаны 1 и 2 признаки гипотезы.

#### Глава З Имитационное моделирование процесса стружкообразования

Работами профессора Полетики М.Ф. [109] показана зависимость вида стружки от температурно – скоростного фактора. При обработке деталей из разных материалов во всем температурном диапазоне резания материалов вид стружки может меняться: элементная, суставчатая, сливная, суставчатая, элементная, как показано на рисунке 1.45.

Для объяснения этого эффекта и решения второй задачи было проведено имитационное моделирование процесса стружкообразования, а также исследование механики процесса резания и образования стружки во всём температурном диапазоне резания металлов.

### 3.1 Силовые граничные условия

Метод графического моделирования процесса точения заключается в наглядном изображении заготовки и стружкообразования. Это дает нам возможность проследить все деформационные процессы, протекающие в стружке. Величины напряжений покажут нам где и как возникают деформации [137]. Для того чтобы графически смоделировать процесс точения, необходимо правильно расположить в пространстве (на чертеже) обрабатываемую заготовку и токарный резец, как показано на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Трёхмерные модели имитационного моделирования процесса черново-

го точения

Для того, что бы обосновать предположение о возникновении критических деформационных процессов, было проведено т.н. «имитационное моделирование» процесса чернового точения (моделирование проводилось в программе «Компас V13», ANSYS с последующим занесением измеренной информации в таблицы Excel).

Для получения приближенных объективных данных необходимо обеспечить нераспределённость силы  $P_Z$  на контактную поверхность стружки [137], разбив длину контакта на десять равных частей, в каждой из которой величина силы  $P_Z$  уменьшается по закону прямоугольного треугольника, как показано на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Силовые граничные условия процесса стружкообразования

При расчете картин изолиний в программе «ANSYS» необходимо задать физико-механические характеристики обрабатываемого материала стали 10Х11Н23Т3МР (ЭП33ВД). Коэффициент пуассона равный 0,3 и модуль юнга – 160000 МПа.

Условия нагрузки были аналогичны условиям свободного чернового точения (материал режущей части ВК8, главный передний угол  $\gamma=0^\circ$ , главный угол в плане  $\phi=0^\circ$ , обрабатываемый материал сталь 10Х11Н23ТЗМР (ЭП33ВД), припуск на обработку t=1,5мм, скорость резания V=50м/мин, расчетная сила резания P<sub>Z</sub> = 3859H [102].

Для расчетов напряжений используется метод конечных элементов. Исходным объектом для применения МКЭ является материальное тело (в общем случае - область, занимаемая сплошной средой или полем), которое разбивается на части - конечные элементы (КЭ). В результате разбивки создаётся *сетка* из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют узлы [104],[117]. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основной конечно-элементной моделью деформируемого тела. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта.

Программа «ANSYS» автоматически разбивает трёхмерную модель на конечно-элементную сетку с дискретностью на 3432 узла и 3311 элемента, как показано на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Конечноэлементная сетка в продольном сечении стружки

## 3.2 Напряженно - деформированное состояние стружки с применением МКЭ

Расчет напряженно - деформированного состояния стружки с применением МКЭ был проведён в трёх сечениях:

А-Б – условная плоскость сдвига;

 А-В – плоскость, перпендикулярная направлению схода стружки в зоне контакта с передней поверхностью инструмента;

А-Г – плоскость, проведённая через точку А (точка изменения направления схода стружки на свободной поверхности стружки) в начале её образования и точку Г отрыва стружки от передней поверхности.

Анализ напряженно деформированного состояния по сечениям стружки А-Б, А-В, А-Г показал следующее: опасные напряжения растяжения  $\sigma_1$  имеют большие положительные значения в точках А, Б, Г, а в остальных точках контакта стружки с передней поверхностью значения  $\sigma_1$  стремятся к нулю. Максимальные значения напряжений растяжения  $\sigma_1$  достигаются в точке Г в сечении А-Г, как показано на рисунках 3.4, 3.5.



Рисунок 3.4 – Картина изолиний напряжений растяжения σ<sub>1</sub> при точении в продольном сечении стружки (сталь 10X11H23T3MP; S=0,42; V=50м/мин; t=1,5мм)



Рисунок 3.5 – Эпюры напряжений растяжения σ<sub>1</sub> при точении в сечениях A-Б, A-B, A-Г (сталь 10Х11H23T3MP; S=0,42; V=50м/мин; t=1,5мм)

Напряжения сжатия  $\sigma_3$  достигают максимальные значения в сечении А-Б, как показано на рисунках 3.6, 3.7.



Рисунок 3.6 – Картины изолиний напряжений сжатия σ<sub>3</sub> в продольном сечении стружки (сталь 10Х11H23T3MP; S=0,42; V=50м/мин; t=1,5мм)



Рисунок 3.7 – Эпюры напряжений растяжения (о<sub>3</sub>) при точении в сечениях А-Б, А-В, А-Г (сталь 10Х11H23T3MP; S=0,42; V=50м/мин; t=1,5мм)

Значения эквивалентных напряжений σ<sub>экв.</sub>, рассчитанных по Мизесу в продольном сечении стружки, достигают максимальных значений в сечении А-Б (теоретической плоскости сдвига), как показано на рисунках 3.8, 3.9.



Рисунок 3.8 – Картины изолиний эквивалентных напряжений σ<sub>экв</sub> по Мизесу в продольном сечении стружки



Рисунок 3.9 – Эпюры эквивалентных напряжений (σ<sub>экв</sub>) при точении в сечениях А-Б, А-В, А-Г (сталь 10Х11H23T3MP; S=0,42; V=50м/мин; t=1,5мм)



Картины направлений векторов в узловых точках обрабатываемого материала позволили построить траектории зон напряжения и сжатия в стружке, по которым можно построить линии основного напряжения сдвига, как показано на рисунке 3.10

Рисунок 3.10 – Линии основного напряжения сдвига при свободном резании, (*γ*=90°)

#### 3.3 Достоверность полученных результатов моделирования процесса резания

Для проверки достоверности получаемых результатов произвели сравнение изохроматических линий М. Окаши и С. Фукуи и изолиний максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$ , произведённых автором с помощью имитационного

моделирования. Проверка показала абсолютное сходство результатов как на картинах изохроматических линий максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$ , так и на линий основного напряжения сдвига при свободном резании, как представлено на рисунках 3.11 и 3.12 [152],[153].





Картины изолиний максимальных касательных напряжений τ<sub>max</sub> при свободном резании, (γ=90°): а) на модели из оптически активного материала [153]; б) при имитационном моделировании образования стружки.





Картины изолиний главных опасных напряжений растяжений при имитационном моделировании образования стружки: в) [152]; г) авторская методика.

Рисунок 3.11- Картины изолиний



a)



Рисунок 3.12 – Линии основного напряжения сдвига при свободном резании, (γ=90°): а) на модели из оптически активного материала [153]; б) при имитаци-

## онном моделировании образования стружки

А также обнаружено сходство место расположения опасных зон напряжений растяжения, представленных на рисунке 3.11 в), г) [152],[153].

На основании результатов исследования НДС можно говорить о выявленной и вскрытой механики разрушения обрабатываемого материала при превращении его в стружку для стали 10Х11Н23ТЗМР:

- в температурном диапазоне от 400° до 600° происходит разрушение пластическое - сдвигом в сечении А-Б в зоне с максимальными значениями эквивалентных напряжений σ<sub>экв.</sub> по Мизесу;

- в температурном диапазоне от 800° до 900° при высокотемпературном охрупчивании обрабатываемого материала происходит дальнейшая потеря пластичности, разрушение хрупкое – отрывом в сечении А-Г, в зоне с максимальными значениями напряжений растяжения σ<sub>1</sub>;

- в температурном диапазоне от 600° до 800° происходит смешанное разрушение хрупко – пластическое – сдвигом и отрывом, в котором участвуют и напряжения растяжения σ<sub>1</sub> и эквивалентные напряжения σ<sub>экв.</sub> по Мизесу;

#### 3.4 Выводы

 На основе метода конечных элементов с использованием программного пакета ANSIS 14.5 рассчитано напряженно-деформированное состояние области стружкообразования в условиях идентичных условиям при черновом точении стали 10Х11Н23ТЗМР. Получены картины изолиний главных напряжений σ<sub>1</sub>, σ<sub>3</sub> в области стружкообразования; построены эпюры распределения главных напряжений в сечении плоскости сдвига стружки, в нормальном сечении стружки и в сечении зоны отрыва стружки.

2) Выявлена и вскрыта механика процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого материала методом конечных элементов в упругопластической модели продольного сечения стружки.

3) Зоны локального скопления напряжений растяжений есть не только в плоскости сдвига, но и в конце линии контакта стружки с передней поверхностью режущего клина, это говорит о разрушении стружки, как в зоне сдвига, так и в конце линии контакта стружки с передней поверхностью режущего клина.

Значения напряжений растяжения (σ<sub>1</sub>) и эквивалентных напряжений (σ<sub>экв</sub>) в конце линии контакта стружки с передней поверхностью режущего клина превышают примерно на 50% значения напряжений в плоскости сдвига.

5) Траектории линий максимальных касательных напряжений (τ<sub>max</sub>) совпадают с линиями основного напряжения сдвига, представленными М.Окаши и С.Фукуи, и могут быть критериальным значением при разрушении стружки.

# Глава 4 Экспериментальные исследования зависимостей деформации и формы стружки от температуры резания

В главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса стружкообразования при точении с различными температурно-скоростными режимами во всем температурном диапазоне резания металлов от 200° С до 1000° С.

# 4.1 Результаты экспериментальных исследований зависимости вида стружки от температуры

Обработка заготовок производилась при постоянной подаче S=0,42 мм/об и глубине резания t=1,5мм. Скорость резания изменялась в диапазоне V=5...200 м/мин.

Как показывают экспериментальные исследования по обработке сталей, вид стружки оказывается довольно чувствительным к изменению скорости и температуры резания.

В таблицах 4.1 - 4.5 приведены результаты экспериментальных исследований, по изменению видов стружки, относительного поверхностного износа  $h_{on3}$  мкм/ $10^3 \cdot cm^2$ , коэффициента усадки стружки  $\xi$ , длины спирали стружки 1 при обработке сталей в зависимости от скорости V м/мин и температуры резания  $\theta^{\circ}$ С.

Таблица 4.1 – Изменение видов стружки при обработке стали 10X11H23T3MP, резцом из твердого сплава ВК8  $\gamma$ =10°,  $\alpha$ =10°,  $\lambda$ =0°,  $\varphi$ =45° в зависимости от скорости и температуры резания

| N⁰   | Сталь ЭП33ВД (10Х11Н23Т3МР)    | V     | ۵°C | h <sub>опз</sub>       | u       | 1   |
|------|--------------------------------|-------|-----|------------------------|---------|-----|
| п.п. | Вид стружки                    | м/мин | 0 C | мкм/ $10^3 \cdot cm^2$ | ر.<br>ر | MM  |
| 1    | Сливная спираль цилиндрическая | 5     | 560 | 371                    | 4,5     | 120 |
| 2    | Сливная спираль цилиндрическая | 22    | 600 | 350                    | 4,6     | 120 |
| 3    | Сливная спираль цилиндрическая | 34    | 700 | 276                    | 3,2     | 100 |

| 4 | Суставчатая       | 50  | 760  | 310  | 3,38 | 70 |
|---|-------------------|-----|------|------|------|----|
| 5 | Суставчатая       | 57  | 790  | 598  | 3,38 | 50 |
| 6 | CVCTABHATAG       | 76  | 860  | 1041 | 3,38 | 35 |
| 7 | Элементная        | 112 | 950  | 1160 | 3,35 | 20 |
| 8 | <b>Элементная</b> | 148 | 1040 | 1501 | 3,35 | 10 |

Таблица 4.2 – Изменение видов стружки при обработке стали 40Х резцом из твердого сплава ВК8 γ=10°, α=10°, λ=0°, φ=45° в зависимости от скорости и температуры резания

| N⁰   | Сталь 40Х                           | V     | A°C | h <sub>опз</sub>       | بر     | 1  |
|------|-------------------------------------|-------|-----|------------------------|--------|----|
| П.П. | Вид стружки                         | м/мин | 00  | мкм/ $10^3 \cdot cm^2$ | ر<br>ک | MM |
| 1    | Элементная                          | 9,73  | 575 | 300                    | 2,20   | 15 |
| 2    | Суставчатая                         | 15,33 | 603 | 250                    | 2,17   | 20 |
| 3    | Суставчатая                         | 19,46 | 618 | 200                    | 1,63   | 20 |
| 4    | Сливная спираль цилиндриче-<br>ская | 24,33 | 635 | 200                    | 2,0    | 50 |

| Ipo | должение таблицы 4.2     |       |     |     |      |    |
|-----|--------------------------|-------|-----|-----|------|----|
| 5   | Сливная спираль винтовая | 30,66 | 660 | 150 | 2,07 | 50 |
| 6   | Сливная путаная          | 38,93 | 680 | 150 | 2,17 | 75 |
| 7   | Сливная путаная          | 48,67 | 700 | 150 | 2,07 | 70 |
| 8   | Cr C                     | 77,87 | 760 | 150 | 1,79 | 40 |
|     | Суставчатая              |       |     |     |      |    |

Про

|    | Сустариатая      |        |     |      |      |    |
|----|------------------|--------|-----|------|------|----|
| 9  | Суставчатая      | 97,34  | 780 | 500  | 1,74 | 30 |
| 10 | же<br>Элементная | 153,31 | 970 | 1050 | 1,74 | 5  |

| Габлица 4.3 – Изменение видов стружки при обработке стали З0ХГСА, резцом из твер   |
|--|
| ого сплава ВК8 γ=10°, α=10°, λ=0°, φ=45° в зависимости от скорости и температуры р |
| ания   |

| №    | Сталь ЗОХГСА                                | V     | ₽°C | h <sub>опз</sub>                     | ع   | 1   |
|------|---|-------|-----|--------------------------------------|-----|-----|
| п.п. | Вид стружки                                 | м/мин | • • | мкм/10 <sup>3</sup> ·см <sup>2</sup> | ſ   | MM  |
| 1    | Сливная спираль винтовая                    | 26    | 526 | 136                                  | 4,7 | 40  |
| 2    | <b>Сливная спираль цилиндри-<br/>ческая</b> | 53    | 567 | 142                                  | 5,2 | 100 |
| 3    | Сливная спираль цилиндри-<br>ческая         | 88    | 660 | 177                                  | 4,2 | 120 |
| 4    | Суставчатая                                 | 113   | 750 | 154                                  | 3,6 | 80  |
| 5    | Суставчатая                                 | 127   | 820 | 225                                  | 4,2 | 20  |

Таблица 4.4. – Изменение видов стружки при обработке стали 1Х18Н9Т, резцом из твердого сплава ВК8  $\gamma$ =10°,  $\alpha$ =10°,  $\lambda$ =0°,  $\varphi$ =45° в зависимости от скорости и температуры резания

| <u>№</u><br>п.п. | 1Х18Н9Т Вид стружки    | V<br>м/мин | θ°C | h <sub>опз</sub><br>мкм/10 <sup>3</sup> ·см <sup>2</sup> | ېر   | l<br>мм |
|------------------|------------------------|------------|-----|--|------|---------|
| 1                | Суставчатая            | 30         | 550 | 0,1  | 1,27 | 25      |
| 2                | инициализато Сливная   | 50         | 600 | 0,05   | 1,19 | 60      |
| 3                | Сливная                | 77         | 706 | 0,05   | 1,16 | 100     |
| 4                | Сливная                | 100        | 750 | 0,1  | 1,19 | 70      |
| 5                | Суставчатая            | 120        | 780 | 0,1  | 1,08 | 50      |
| 6                | С 5<br>Элементная      | 154        | 830 | 0,4  | 1,08 | 15      |
| 7                | 5 собези<br>Элементная | 194        | 900 | 1  | 1,08 | 7       |

| Табл | ица 4.5. – Изменение видов стру  | ужки при об   | бработке ста | ли 14Х17Н2, <u>1</u> | резцом | из твер | )- |
|------|----------------------------------|---------------|--------------|----------------------|--------|---------|----|
| дого | сплава ВК8 γ=10°, α=10°, λ=0°, φ | р=45° в завис | симости от т | температуры р        | езания | [       |    |
|      |                                  |               |              |                      |        |         |    |

| №<br>п.п. | 14X17H2Вид стружки       | V<br>м/мин | θ°C | $h_{\text{опз}}$<br>мкм/10 <sup>3</sup> · см <sup>2</sup> | ξ   | 1<br>мм |
|-----------|--------------------------|------------|-----|---|-----|---------|
| 1         | Сливная спираль винтовая | 41         | 650 | 172   | 3,4 | 80      |
| 2         | Сливная                  | 54         | 680 | 239   | 3,3 | 100     |
| 3         | Суставчатая              | 116        | 780 | 155   | 2,7 | 30      |
| 4         | Элементная               | 143        | 830 | 302   | 2,8 | 20      |

Результаты экспериментальных исследований показали зависимость вида стружки от температуры резания, а именно с повышением скорости и температуры резания переход от одного вида стружкообразования к другому происходит дважды: сначала (при низких температурах) ( $\approx 500^{\circ} - 600^{\circ}$ ) элементная стружка, характеризующаяся такими параметрами, как угол наклона плоскости сдвига (скола) элемента –  $\phi_{\rm K}$ , толщина стружки или высота элемента –  $a_1$ , высота сплошного участка стружи -  $a_2$ , толщина элемента –  $b_1$ , шаг элементов – m, переходит в сливную с

основными характеристиками: коэффициентом усадки стружки  $\xi$  и углом наклона условной плоскости сдвига -  $\phi_K$ , дальнейшее повышение температуры ( $\approx 750^{\circ}$ -800°) вызывает обратный переход сливной стружки в элементную, как показано на рисунке 1.45. Экспериментальные данные показали хорошую корреляцию с результатами экспериментов работ [8], [9],[10].

В элементных стружках сплошность нарушена (она всегда меньше единицы), поэтому длина элементной стружки получается больше, чем сливной. Отношение  $a_1/a_2$  характеризует сплошность стружки [117], [118]. В большей степени деформированное состояние характеризуется отношением толщины стружки по выступам  $a_1$  к толщине среза.

Кроме этого, основным параметром элементной стружки является угол между свободной поверхностью элемента и направлением скорости резания –  $\psi$ , как показано на рисунке 1.22, который может характеризовать сдвиговые деформации. Эти характеристики могут быть легко зафиксированы на стружке и отражают конечную стадию деформации элементов.

Результаты эксперимента полностью подтверждают диаграмму, представленную профессором Полетикой М.Ф.[108],[109], как показано на рисунке 1.20.

В связи с автоматизацией и роботизацией машиностроительного производства возникла необходимость в автоматическом удалении стружки из зоны резания, что проблематично в связи с высокой прочностью и вязкостью обрабатываемого материала, стружка которого повреждает обработанную поверхность детали и, попадая в зону резания, ведет к преждевременному разрушению режущего инструмента. Пользуясь результатами анализа экспериментальных исследований, разработана методика по дроблению стружки из труднообрабатываемых сталей.

## 4.2 Механика процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого материала

Для исследованных материалов была экспериментально доказана общая тенденция изменения вида стружки в зависимости от температурно-скоростного фактора, как показано в таблицах 4.1 - 4.5: элементная, суставчатая, сливная, суставчатая, элементная. Анализ результатов эксперимента показал, что для одного и того же материала в зависимости от температурно-скоростного фактора имеет место изменение вида стружки (сливная, суставчатая, элементная), как показано в таблицах 3.1-3.7. Таким образом, доказан 1 признак гипотезы об изменении вида стружки от сливной в элементную в зависимости от температурно - скоростного фактора.



Рисунок 4.1 – Зависимость длины спирали стружки  $l_C$  от температуры резания  $\theta^{\circ}C$ 

На основании сравнительного анализа зависимостей, приведенных на рисунках 2.1-2.5 и 4.1, установлена взаимосвязь между длиной стружки и величиной минимального относительного сужения обрабатываемых материалов  $l_C = f(\psi)$  при резании, то есть при увеличении  $\psi_{min}$ :  $\psi_{1min} > \psi_{2min} > \psi_{4min}$  ссоответственно  $l_{C1max} > l_{C2}$ <sub>max</sub>  $> l_{C3max} > l_{C4max}$ .

Таким образом, установлена взаимосвязь величины минимального относительного сужения материала, вида и длины стружки обрабатываемого материала при разных скоростях и температурах резания, доказывающая физическую природу механики разрушения отрывом с образованием элементной стружки при механической обработке резанием. Таким образом, доказан 3 признак гипотезы.

Обмер большого числа микрофотографий стружек позволил получить значения показателей коэффициента сплошности для стружек в зависимости от скорости резания и температуры резания [11].

Так как на элементной стружке сложно определить коэффициент усадки стружки, а необходимость в размерной характеристике имеется, то в работе было принято решение в качестве размерного параметра стружки использовать коэффициент сплошности, представленный на рисунке 1.47 и в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Влияние температуры резания на вид стружки и угол поверхности разрушения стружки б при резании сталей

| стали 10X11H23T3MP (ЭП33BД) |                                   |       |     |      |                        |  |  |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------|-----|------|------------------------|--|--|
| N⁰                          | Вид и угол поверхности разрушения | V     | θ°C | k    | Вил разрушения         |  |  |
| П.П.                        | стружки б                         | м/мин | • • | К    | вид разрушения         |  |  |
| 1                           | Бливная спираль винтовая          | 5     | 560 | 0,98 | Пластическое - сдвигом |  |  |

| 3 | 68°<br>68°<br>01 мм<br>Суставчатая   | 50  | 760  | 0,87 | Хрупко –<br>пластическое –<br>сдвигом и<br>отрывом |
|---|--------------------------------------|-----|------|------|--|
| 4 | 01 мм 75°<br>Горинания<br>Элементная | 76  | 860  | 0,44 | Хрупкое –<br>отрывом                               |
| 5 | В7°<br>01 мм<br>Элементная           | 148 | 1040 | 0,41 | Хрупкое –<br>отрывом                               |

| Сталь 30ХГС |   |            |     |      |  |  |
|-------------|---|------------|-----|------|--|--|
| №<br>п.п.   | Вид и угол поверхности разрушения<br>стружки б          | V<br>м/мин | θ°C | k    | Вид разрушения   |  |
| 1           | Сливная, спираль винтовая                               | 26         | 526 | 1    | Пластическое   |  |
| 2           | 0,1 мм<br>65°<br>65°<br>Сливная, спираль цилиндрическая | 53         | 567 | 0,98 | $ \begin{array}{c}  & T_{acc} & \sigma_j \\  & T_$ |  |
| 3           | 72°<br>72°<br>01 мм<br>Сливная спираль цилиндрическая   | 88         | 660 | 0,86 | Хрупко –<br>пластическое   |  |



| Сталь 14X17H2 |  |            |     |      |                          |
|---------------|--|------------|-----|------|--------------------------|
| №<br>п.п.     | Вид и угол поверхности разрушения<br>стружки δ | V<br>м/мин | θ°C | k    | Вид разрушения           |
| 1             | 38°<br>01 мм<br>Сливная спираль винтовая       | 41         | 526 | 1    | Пластическое             |
| 2             | 40°<br>40°<br>Сливная спираль цилиндрическая   | 54         | 567 | 1    | Пластическое             |
| 3             | <u>01 мм</u><br>65°<br>01 мм<br>65°            | 116        | 660 | 0,49 | Хрупко –<br>пластическое |

Хрупкое 5 143 820 0.47 Элементная

На основании анализа результатов эксперимента автором было установлено, что критерием определения условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при резании помимо угла текстуры стружки, может быть коэффициент сплошности стружки, определяемый в продольном сечении стружки в проходящем свете по методике Розенберга Ю.А. [117].

Но данная методика не позволяет точно определять коэффициент сплошности по отношению толщины стружки, так как возможны случаи, когда толщина стружки сильно отличается и очень сложно определить толщину сплошного слоя даже по микрошлифам продольного сечения стружки по всему сечению, как показано на рисунке – 4.2,б). Возникает вопрос, до какого сечения производить микрошлифы.

Поэтому был разработан и применён метод определения коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub>, определяемый из отношения максимальной площади поперечного сечения стружки к площади сплошного слоя стружки в этом сечении,  $k_{s} = \frac{s_{2}}{s_{1}}$ , где  $S_{1}$  – максимальная площадь поперечного сечения стружки;  $S_{2}$  – площадь сплошного слоя стружки как правило, сплошной слой стружки обуславливается четкой



зернистостью (фасетками) в отличие от остальной сглаженной поверхности, как показано на рисунке 4.2, б).

Пользуясь оптическими приборами, показанными на рисунке 2.4, производятся фрактограммы разрушения стружки, изображения которых в графической вычислительной программе КОМПАС – 3D V13 делят на общий профиль стружки и профиль сплошного слоя, как показано на рисунке 4.2 б). По общему контуру и контуру сплошного слоя стружки наносится сплошная линия, далее в этой-же программе производится измерение площадей стружки и расчет коэффициента сплошности.



Рисунок 4.2 – Методики определения коэффициента сплошности Полезность фрактограммы определяется той информацией, которая может быть получена при ее изучении. По фрактограмме можно судить об условиях нагружения, влиянии температуры и внешней среды, очаге разрушения и процессе роста трещины до окончательного разрушения [139].
Таблица 4.7 – Фрактограммы разрушений стружки в зависимости от температуры резания

| Сталь ЗОХГСА Разрушение стружки  | Вид стружки   | Коэффициент<br>сплошности k   |  |  |  |  |
|--|---|---|--|--|--|--|
|  |   | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 1,62 \text{ мм}$<br>$a_2 = 1,62 \text{ мм}$<br>k = 1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 2,5078 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 2,5960 \text{ мм}^2$<br>k = 0,96   |  |  |  |  |
| V=26 м/мин; θ= 526°С   | Сливная спираль винтовая                              |   |  |  |  |  |
| Elabaladadadadadadadadadadadadadadadadada  |   | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 1,35$ мм<br>$a_2 = 1,35$ мм<br>k=1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 2,8$ мм <sup>2</sup><br>$S_2 = 3$ мм <sup>2</sup><br>k=0,93   |  |  |  |  |
|  |   |   |  |  |  |  |
| V=53 м/мин: θ=567°С  | Сливная спираль п                                     | илинлрическая   |  |  |  |  |
| V=53 м/мин; θ=567°С  | Сливная спираль ц                                     | илиндрическая<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1=0, 9 \text{ мм}$<br>$a_2=1,1 \text{ мм}$<br>k=0,8<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1=1,8465 \text{ мм}^2$<br>$S_2=2,3998 \text{ мм}^2$<br>k=0,74   |  |  |  |  |
| V=53 м/мин; θ=567°С<br>Городиние и пределатории и пре | Сливная спираль ц                                     | илиндрическая<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>а <sub>1</sub> = 0, 9 мм<br>а <sub>2</sub> = 1,1 мм<br>k=0,8<br>Авторская ме-<br>тодика<br>S <sub>1</sub> =1,8465 мм <sup>2</sup><br>S <sub>2</sub> =2,3998 мм <sup>2</sup><br>k=0,74   |  |  |  |  |
| V=53 м/мин; $\theta$ =567°C  | Сливная спираль ц<br>Сливная спираль ц<br>Суставчатая | илиндрическая<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1=0, 9 \text{ мм}$<br>$a_2=1,1 \text{ мм}$<br>k=0,8<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1=1,8465 \text{ мм}^2$<br>$S_2=2,3998 \text{ мм}^2$<br>k=0,74<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1=0,92 \text{ мм}$<br>$a_2=1,1 \text{ мм}$<br>k=0,83<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1=1,5682 \text{ мм}^2$<br>$S_2=2,1437 \text{ мм}^2$<br>k=0,7 |  |  |  |  |

Продолжение таблицы 4.7

|   |             | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,75$ мм<br>$a_2 = 1$ мм<br>k = 0,75<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,913$ мм <sup>2</sup><br>$S_2 = 1,498$ мм <sup>2</sup><br>k = 0,6  |
|---|-------------|---|
| V=127 м/мин; θ=820°С  | Суставчатая |   |
| Сталь ЭП33ВД (10Х11Н23Т3МР)<br>Разрушение стружки   | Вид стружки | Коэффициент<br>сплошности k   |
|   | a.          | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 1,08 \text{ мм}$<br>$a_2 = 1,08 \text{ мм}$<br>k = 1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 1,1315 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 1,1500 \text{ мм}^2$<br>k = 0,98   |
| V=5 м/мин; θ= 560°С   | Сливная     | - ,   |
|   |             | M   |
| S10<br>S2<br>WWW S20'0  |             | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,7 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,81 \text{ мм}$<br>k = 0,85<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,6521 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 0,7443 \text{ мм}^2$<br>k = 0,87   |
| Sta         Городина         Городина           V=50 м/мин; θ=760°С         Городина         Городина   | Суставчатая | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,7 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,81 \text{ мм}$<br>k = 0,85<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,6521 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 0,7443 \text{ мм}^2$<br>k = 0,87   |
| Σφ       Γ         Sφ       -         V=50 м/мин; θ=760°C       Γ         Σφ       -         Sφ       - <td< td=""><td></td><td>Методика проф.<br/>Розенберга Ю.А.<br/><math>a_1 = 0,7 \text{ мм}</math><br/><math>a_2 = 0,81 \text{ мм}</math><br/>k = 0,85<br/>Авторская ме-<br/>тодика<br/><math>S_1 = 0,6521 \text{ мм}^2</math><br/><math>S_2 = 0,7443 \text{ мм}^2</math><br/>k = 0,87<br/>Методика проф.<br/>Розенберга Ю.А.<br/><math>a_1 = 0,49 \text{ мм}</math><br/><math>a_2 = 0,82 \text{ мм}</math><br/>k = 0,59<br/>Авторская ме-<br/>тодика<br/><math>S_1 = 0,2775 \text{ мм}^2</math><br/><math>S_2 = 0,6355 \text{ мм}^2</math><br/>k = 0,44</td></td<> |             | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,7 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,81 \text{ мм}$<br>k = 0,85<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,6521 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 0,7443 \text{ мм}^2$<br>k = 0,87<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,49 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,82 \text{ мм}$<br>k = 0,59<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,2775 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 0,6355 \text{ мм}^2$<br>k = 0,44 |

Продолжение таблицы 4.7

| Sto<br>S2<br>00052 MMM S2C0   | ar<br>ar                       | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,46$ мм<br>$a_2 = 0,92$ мм<br>k = 0,5<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,2975$ мм <sup>2</sup><br>$S_2 = 0,7159$ мм <sup>2</sup>  |
|---|--------------------------------|--|
|   | The second                     | k=0,41   |
| V=148 м/мин; θ=1040°С   | Элементная                     |  |
| Сталь 14Х17Н2<br>Разрушение стружки   | Вид стружки                    | Коэффициент<br>сплошности  |
|   | June 19                        | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1=0,9 \text{ мм}$<br>$a_2=0,9 \text{ мм}$<br>k=1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1=1,4546 \text{ мм}^2$<br>$S_2=1,4546 \text{ мм}^2$<br>k=1   |
|   |                                |  |
| $V = 41 \text{ м/мин}; \theta = 650^{\circ}\text{C}$  | Сливная                        |  |
| V= 41 м/мин; θ=650°С  | Сливная                        | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,925 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,925 \text{ мм}$<br>k=1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>k=1   |
| V= 41 м/мин; θ=650°С<br>Городинание и предоставляется и предоставл<br>И предоставляется и предоставляется | Сливная                        | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,925 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,925 \text{ мм}$<br>k=1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>k=1   |
| V= 41 м/мин; 0=650°С         Горование         V=54 м/мин; 0=680°С         Горование         Горование <td>Сливная<br/>Голивная<br/>Сливная</td> <td>Методика проф.<br/>Розенберга Ю.А.<br/><math>a_1 = 0,925 \text{ мм}</math><br/><math>a_2 = 0,925 \text{ мм}</math><br/>k=1<br/>Авторская ме-<br/>тодика<br/><math>S_1 = 1,7047 \text{ мм}^2</math><br/><math>S_2 = 1,7047 \text{ мм}^2</math><br/>k=1<br/>Методика проф.<br/>Розенберга Ю.А.<br/><math>a_1 = 0,37 \text{ мм}</math><br/><math>a_2 = 0,72 \text{ мм}</math><br/>k=0,51<br/>Авторская ме-<br/>тодика<br/><math>S_1 = 0,5901 \text{ мм}^2</math><br/><math>S_2 = 1,1860 \text{ мм}^2</math><br/>k=0,49</td>   | Сливная<br>Голивная<br>Сливная | Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,925 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,925 \text{ мм}$<br>k=1<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 1,7047 \text{ мм}^2$<br>k=1<br>Методика проф.<br>Розенберга Ю.А.<br>$a_1 = 0,37 \text{ мм}$<br>$a_2 = 0,72 \text{ мм}$<br>k=0,51<br>Авторская ме-<br>тодика<br>$S_1 = 0,5901 \text{ мм}^2$<br>$S_2 = 1,1860 \text{ мм}^2$<br>k=0,49 |

Продолжение таблицы 4.7



На основании проведенных опытов было установлено, что с повышением температуры резания происходит изменение вида стружки, угла текстуры стружки, угла плоскости сдвига, коэффициента сплошности стружки.

Анализ механики разрушения при превращении обрабатываемого материала в стружку показал следующее:

при увеличении скорости резания в интервале V(26,88,127) м/мин, растет температура резания θ°(526°C, 660°C,820°C) и уменьшается коэффициент сплошности материалов k (1, 0,86, 0,2) и, соответственно, изменяется вид стружки: сливная, суставчатая, элементная, увеличивается угол текстуры разрушения δ (45°, 72°, 90°), изменяется вид разрушения – пластическое, хрупко-пластическое, хрупкое.

На основании анализа результатов исследования можно сделать вывод, что при превращении обрабатываемого материала в стружку при разных температурноскоростных параметрах механика процесса разрушения металлов происходит следующим образом: пластическое – сдвигом (δ=45°), хрупко-пластическое - сдвигом и отрывом (δ=72°), хрупкое – отрывом (δ=90°), как показано в таблице 4.7.

Можно было бы предположить, что разогрев металла стружки до температур 800° - 1000°С должен привести к увеличению пластичности жаропрочных сталей и, как следствие, к уменьшению шага стружки и угла сдвига, и увеличению ее коэффициента сплошности, но экспериментальные данные на рисунках 4.3 и 4.4 показывают обратное, объясняется это высокотемпературным охрупчиванием обрабатываемого материала [36].



Рисунок 4.3 – Графики зависимости коэффициента сплошности от температуры резания θ°С, при обработки точением (BK8, 10X11H23T3MP): ◆ - по методике проф. Розенбергу Ю.А., ● – по авторской методике



эффициента сплошности от температуры резания θ°С, при обработки точением (ВК8, 30ХГСА): ◆ - по методике проф. Розенберга Ю.А., ● – по авторской методике

На основании анализа зависимостей коэффициента сплошности от температуры резания автором установлена прямо пропорциональная зависимость при высокотемпературном охрупчивании жаропрочных материалов при начальной температуре (760°С) и температуре охрупчивания (860°С), между отношениями значений коэффициента

сплошности 
$$k_{s1}$$
 и  $k_{s2}$ .  $\frac{k_{s1}}{k_{s2}} \approx \frac{0.87}{0.44} \approx 1.9$ 

Результаты, полученные по авторской методике, позволяют определить коэффициент сплошности точнее на 10 %, чем по методике определения коэффициента сплошности в проходящем свете продольного сечения стружки.

Результаты экспериментальных исследований, изложенных выше, хорошо коррелируют с теоретическими основами образования различных видов стружки, в том числе элементной через коэффициент сплошности стружки k, сформулированными профессором Розенбергом Ю.А., как показано на рисунках 4.3,4.4.

113

# 4.3 Выводы

1. Экспериментально установлена взаимосвязь вида стружки (сливная, суставчатая, элементная) от температурно-скоростного фактора и механических характеристик обрабатываемого материала во всем температурном диапазоне резания металлов.

2. Выявлена механика процесса образования стружки через разрушение обрабатываемого материала.

3. Установлено экспериментально, что угол поверхности разрушения стружки зависит от температурно-скоростного фактора.

4. Установлено экспериментально, что критерием определения условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов резанием помимо угла текстуры стружки может быть коэффициент сплошности стружки.

## Глава 5 Практическая реализация

В главе приведены разработанные для практического использования новые технические и технологические решения и методики, в основу которых положен запатентованный способ на изобретение, на основе которых разработан алгоритм и программа формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных сталей резанием на основе температуры появления высокотемпературного охрупчивания, обеспечивающая условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов резанием.

# 5.1 Новые технические решения

## 5.1.1 Разработанный и запатентованный способ

Разработан и запатентован способ: «Способ определения оптимальной скорости резания» Патент № 2535839 [97].

Изобретение относится к области обработки металлов резанием. Способ заключается в определении зависимости температуры резания от скорости резания по результатам кратковременных испытаний с построением общего графика зависимостей окружной силы резания, усадки стружки, температуры резания от скорости резания. Для сокращения трудоемкости определения оптимальной скорости резания на основе стандартных кратковременных испытаний при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе для твердосплавного инструмента, включающих определение зависимости температуры резания от скорости резания по результатам испытаний с построением графика этой зависимости, определяют температуру резания, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную по результатам кратковременных стандартных испытаний при резании и на графике зависимости температуры резания от скорости резания, представленном на рисунке 5.1, определяют оптимальную скорость резания, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную.

Предлагаемое изобретение решает задачу сокращения трудоемкости определения оптимальной скорости резания на основе стандартных кратковременных испытаний [3], [4], [5].

115

Решение поставленной задачи достигается тем, что в способе определения оптимальной скорости резания для твердосплавного инструмента, включающем кратковременные переточки обрабатываемого материала, получая различные скорости резания, а значит, и температуру резания, пользуясь зависимостью окружной силы резания от скорости резания и усадки стружки, можно определить оптимальную скорость резания.

Изобретение поясняется иллюстративным материалом, где на рисунке 5.1. изображены графики зависимости окружной силы резания  $P_Z$  от скорости резания V(м/мин), усадки стружки  $\xi$  от скорости резания V(м/мин), температуры резания  $\theta^{\circ}$ C от скорости резанияV(м/мин), относительного износа по задней поверхности  $h_{\text{опз}}$  (мм) от скорости резания V(м/мин).

Сущность способа заключается в следующем:

-по результатам точения обрабатываемого материала и измерений температуры резания строится общий график зависимостей P = f(V),  $\xi = f(V)$ ,  $\theta = f(V)$ , как показано на рисунке 5.1., который показывает диапазон температуры резания, при которой стружка из сливной переходит в элементную и коэффициент усадки стружки при любой подаче имеет одно и то же значение. Эта температура резания соответствует оптимальной температуре резания, обеспечивающей минимальный износ (как показано на рисунке 5.1), максимальную работоспособность инструмента по методике, определённой профессором Макаровым А.Д. [3], [4];

-исследование проводится при разных режимах резания, подачи S=0,52 мм/об и разных скоростях резания. Температурно-скоростной диапазон температуры  $20^{\circ}$ C -  $1000^{\circ}$ C и скоростях резания в диапазоне V=12 ÷ 200 м/мин.. В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь 12Х2НВФМА, в качестве режущего инструмента токарный резец ВК8  $\gamma$ =10°,  $\alpha$ =10°,  $\lambda$ =0°,  $\varphi$ =45°. На токарном станке 1К62 производят точение обрабатываемого материала на проход участками по 10-15 мм, фиксируя показания динамометра, пирометра, потенциометра термопары;

-после каждого эксперимента происходит смена режущей пластины, и полученную стружку собирают и определяют усадку стружки; -по результатам эксперимента строится общий график зависимостей силы резания P, усадки стружки ξ и температуры резания θ от скорости резанияV, как показано на рисунке 5.1;

-анализ данных, полученных при эксперименте, позволил выявить общую закономерность изменения вида стружки в зависимости от температурного диапазона, как показано в таблице 5.1: при температуре резания 500°С вид стружки – сливная, угол поверхности разрушения стружки преобладает  $\approx 60^{\circ}$  к контактной поверхности стружки, коэффициент сплошности  $\approx 0,96$ , происходит пластическое разрушение обрабатываемого материала – сдвигом с прочной связью между элементами стружки;

Таблица 5.1 – Изменения видов стружки при обработке стали 12Х2НВФМА, резцом из твердого сплава ВК8  $\gamma$ =10°,  $\alpha$ =10°,  $\lambda$ =0°,  $\phi$ =45°, в зависимости от температуры резания

| Характеристика<br>стружки    | Элементная 1<br>завиток                 | Суставчатая 1<br>завиток                | Суставчатая I≤<br>50 мм | Сливная<br>спиральная I≥ 50<br>мм |  |  |  |
|------------------------------|---|---|-------------------------|-----------------------------------|--|--|--|
| S=0,52 мм/об                 |   | And And                                 | Mitte:                  |                                   |  |  |  |
| Температура<br>резания () °С | 275°C                                   | 300°C                                   | 360°C                   | 400°C                             |  |  |  |
| Характеристика<br>стружки    | теристика<br>ружки 50 мм 50 мм 50 мм    |   |                         | Сливная<br>ленточная              |  |  |  |
| S=0,52 мм/об                 |   |   |                         |                                   |  |  |  |
| Температура<br>резания θ °С  | 440°C                                   | 450°C                                   | 460°C                   | 480°С<br>Элементная 1<br>завиток  |  |  |  |
| Характеристика<br>стружки    | Сливная<br>спиральная I⊵<br>50 мм       | Суставчатая I≤<br>50 мм 1-5<br>завитков | Элементная 1<br>завиток |                                   |  |  |  |
| S=0,52 мм/об                 | 52 MM/06                                |   | 36.6                    | 2.25                              |  |  |  |
| Температура<br>резания Ө °С  | иература<br>ания θ °C 500°C 600°C 670°C |   | 670°C                   | 750°C                             |  |  |  |

- при температуре резания 600°С – вид стружки суставчатая, угол поверхности разрушения стружки стабилизируется и имеет 68° к контактной поверхности стружки, коэффициент сплошности при этом ≈ 0,87, происходит снижение пластичности (уменьшение величины относительного удлинения, как показано на рисунке 5.1) об-

рабатываемого материала и вид разрушения можно считать хрупко – пластическим (сдвигом и отрывом);

- с последующим увеличением температуры резания выше 700°С происходит дальнейшая потеря пластичности и смена вида стружки из суставчатой в элементную с углом поверхности разрушения стружки ≈ 90° к контактной поверхности стружки, с дальнейшим ослаблением связей между элементами, коэффициентом сплошности стремящимся к нулю вплоть до полного их разделения, поэтому вид разрушения можно считать хрупким – отрывом с элементами поверхности разрушения и углом поверхности разрушения стружки ≈ 90°.

По результатам точения обрабатываемого материала и измерений температуры резания необходимо стремиться к той температуре, при которой стружка из сливной (точка 1, как показано на рисунке 5.1.) переходит в элементную (точка 2, как показано на рисунке 5.1.) и коэффициент усадки стружки при любой подаче имеет одно и то же значение. Эта температура резания в диапазоне от 600 ° - 650°C, а оптимальная скорость резания будет равна скоростному диапазону 70-80м/мин.

Для сравнения можно привести данные, полученные при длительных стойкостных исследованиях.

При точении стали 12Х2НВФМА минимум интенсивности износа резца ВК8 наблюдается при температуре резания 580 - 650°С и скорости резания 70-80м/мин.

Таким образом, наглядно видно практическое соответствие оптимальной температуры резания температуре, при которой стружка из сливной переходит в элементную, и коэффициент усадки стружки при любой подаче имеет одно и то же значение.

Применение предлагаемого способа определения оптимальной скорости резания позволяет сократить трудоемкость определения оптимальной скорости резания и расход обрабатываемого материала, так как эксперимент можно проводить в заводских условиях на реальных деталях.

### 5.1.2 Разработаное и запатентованое устройство

Разработано и запатентовано устройство «Устройство для тарирования естественной термопары, измерения сил резания и температуры в процессе резания» Патент № 142320[98].

Полезная модель, представленная на рисунке 2.9, относится к приборостроению, в частности, к измерительным приборам, и предназначено для измерения температурных и силовых параметров резания. Устройство содержит динамометр с режущим инструментом естественной термопарой, пирометр, лазерный прицел которого нацелен в зону резания, и регистрирующее устройство. Дополнительно устройство содержит поворотное механическое устройство, состоящее из площадки основания, установленной на динамометре, и поворотной порталы с прорезями. Пирометр установлен на портале с возможностью ориентирования под разными углами, на разном расстоянии к зоне резания. Обеспечивается тарирование естественной термопары и определять диапазон температуры условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при механической обработке резанием.

Устройство работает следующим образом.

Динамометр 1 с площадкой основанием 2 поворотного механического устройства закрепляется на суппорте металлорежущего станка. Портала с прорезями 3 позволяет ориентировать пирометр 5 относительно вершины токарного резца естественной термопары 4 и поверхности обрабатываемой металлической детали, как показано на рисунке 2.9. При этом лазерный прицел пирометра 5 направлен в зону резания. Прорези порталы 3 позволяют точно ориентировать угол наклона и регулировать положение и фокусное расстояние пирометра.

Особенность работы предлагаемой полезной модели заключается в том, что пирометр установлен на поворотном механическом устройстве, закрепленной на динамометре, что позволяет легко ориентировать его под разными углами относительно любых поверхностей обрабатываемой металлической детали, и обрабатываемого инструмента, не прерывая работу металлообрабатывающего станка. В процессе, например, резания при помощи регистрирующего устройства 6 сравнивают показания пирометра (температура, °С) и милливольтметра (mV). В результате сравнения определяют температурную шкалу термопары для использования ее в дальнейшем в процессе резания без пирометра.

Таким образом, обеспечивается возможность измерения температурных и силовых характеристик резания в процессе обработки резанием. Устройство для измерения температурных и силовых характеристик резания при обработке поверхности резанием позволяет получать достоверные данные о температуре обрабатываемой поверхности детали и сил резания, что важно для исследования и формирования температурного диапазона условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при механической обработке резанием.

#### 5.2 Разработанные методики

Методика формирования температурного диапазона, обеспечивающего условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при механической обработке резанием по виду стружки, разработанного на основании патента № 142320 [98].

Разработанная методика, обеспечивающая условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при механической обработке резанием по виду стружки для твердосплавного инструмента: где определение происходит по зависимости температуры резания от скорости резания по результатам кратковременных испытаний с построением общего графика зависимостей окружной силы резания, усадки стружки, температуры резания от скорости резания. Определение температуры, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную, как показано в таблице 5.1.

Методика формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании твердосплавным инструментом в лабораторных условиях осуществляется следующим образом: образец заготовки из жаропрочной стали закрепляют изолированными кулачками в патроне токарного станка 1К62 и поджимают центром (вращающимся) на задней бабке с токосъемником. Производят точение резцом (естественная термопара ВК8), закрепленным в устройство с одноинструментальной естественной термопарой участками по 100 мм, одновременно снимая показания приборов (милливольтметр - естественная термопара, миллиамперметры приборный щит динамометра, оптический пирометр - температура) по трем составляющим силы резания ( $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ ) для каждой скорости резания V. Режимные условия формируют так, чтобы охватить весь температурно-скоростной диапазон, начиная с температуры 200<sup>о</sup>C и заканчивая температурой потери формоустойчивости режущего клина из ВК8 = 1100<sup>o</sup>C, как показано на рисунке 5.1,[98].

Для наглядности строят общий график зависимостей силы резания P, усадки стружки ξ и температуры резания θ от скорости резанияV, как показано на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Зависимости силы резания P<sub>z</sub>, коэффициента усадки стружки ξ, температуры резания θ,°С, относительного износа по задней поверхности h<sub>опз</sub> (мм) от скорости резания V(м/мин) при обработке стали 10X11H23T3MP

Анализируя данные графика, определяют температуру, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную, как показано на рисунке 5.1. По результатам кратковременных стандартных испытаний при резании и на графике зависимости температуры резания от скорости резания определяют условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную.



Рисунок 5.2 – Определение формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов при резании по виду стружки

Экспресс метод оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки приведён на рисунке 5.2. Делается несколько пробных проходов при точении обрабатываемой детали в следующей последовательности: задаётся начальная скоростьV, затем устанавливается скорость резания меньше начальной V<sub>1</sub> и V<sub>2</sub>, а затем выше начальной V<sub>3</sub> и V<sub>4</sub>. При этом постоянно определяется вид стружки. Процесс формирования температурного диапазона, который обеспечивает условия максимальной обрабатываемости оканчивается при той скорости резания V<sub>0</sub>, при которой образуется суставчато – элементная стружка.

Результаты экспериментальных исследований, изложенных выше, хорошо коррелируют с теоретическими основами образования различных видов стружки, в том числе элементной через коэффициент сплошности стружки k, сформулированными профессором Розенбергом Ю.А.

# 5.3 Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на станках с ЧПУ

Одной из проблем, стоящих перед наукой о резании металлов, является разработка методов, обеспечивающих автоматическую стабилизацию наиболее важных параметров процесса резания [120]. К числу важнейших параметров относится температура резания и, в частности, ее оптимальное значение  $\theta_0$ . Многочисленные технологические испытания показали, что обработка деталей с использованием оптимальных температур резания позволяет значительно увеличить размерную стойкость инструмента, получить минимальные для выбранных условий силы резания, шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, а также наиболее стабильное и равномерное распределение остаточных напряжений в различных точках обрабатываемой поверхности [120, 102, 44].

Работа станков в производственных условиях с использованием оптимальных температур резания является наиболее целесообразной, однако на обычных станках температура в зоне резания изменяется с износом инструмента, изменением структуры материала, диаметра обрабатываемой поверхности, динамической жесткости системы и т. д. В этих условиях становится крайне необходимой автоматизация процессов резания с помощью оснащения металлорежущих станков специальными системами автоматического регулирования, которые независимо от случайных или закономерных причин, вызывающих изменение температуры в зоне резания, автоматически поддерживают одно и то же постоянное, заранее заданное оптимальное значение температуры резания. Таким образом, здесь имеет место более высокая ступень автоматизации операций механической обработки, когда автоматизируются сами процессы резания, когда их протекание автоматически и постоянно поддерживается на оптимальном уровне. Исследования технологических возможностей оптимального резания проводились на токарных станках VIKTOR turn II 26/32 и 1В340Ф30, оборудованных автоматическими системами с ЧПУ FANUC Series 18i – ТВ.



Для применения данной методики в промышленности с выходом на полно-

Рисунок 5.3 – Значения нагрузки на шпиндель от скорости при резании стали 10Х11Н23ТЗМР на станке с ЧПУ VIKTOR, на экране OPERATING MONITOR

стью автоматизированное управление был проведён ряд заводских испытаний на заводе ОАО «Газтурбосервис» с применением оборудования с ЧПУ VICTOR turn II 26. Пользуясь возможностями ЧПУ стойки FANUC Series 18i – ТВ, определяются нагрузки в процессе резания стали 10Х11Н23Т3МР при разных режимах резания в процентах, используя экран OPERATING MONITOR, как показано на рисунке 5.3.

По результатам анализа заводских экспериментальных данных было установлено, что при обработке резанием в зависимости от скорости резания имеют место разные нагрузки на оси X, Z и нагрузка на шпиндель S1, как показано в таблицах 5.2 и 5.3. Таблица 5.2 – Фрактограммы поверхностей разрушения стружки в поперечном сечении в зависимости от температуры резания при резании стали 10X11H23T3MP



Графики на рисунке 5.5 по полученным экспериментальным данным, представленных на рисунке 5.4 и из таблицы 5.3 показали зависимость коэффициента сплошности стружки и зависимость нагрузки по осям и на шпинделе от скорости резания и температурой резания с экстремумами при одних и тех же режимах резания.

| Таблица 5.3 – Результаты эксперимента при резании стали 10X11H2. | 3T3MP |
|--|-------|
|--|-------|

| Наименование характеристик  |      | № п.п. |     |      |     |      |      |      |     |
|---|------|--------|-----|------|-----|------|------|------|-----|
|   |      | 2      | 3   | 4    | 5   | 6    | 7    | 8    | 9   |
| Скорость резания V м/мин.   | 40   | 45     | 50  | 55   | 60  | 65   | 70   | 75   | 80  |
| Подача S мм/об  | 0,4  |        |     |      |     |      |      |      |     |
| Резец ВК8 $\gamma = 10^{\circ}$ , $\alpha = 10^{\circ}$ , $\lambda = 0^{\circ}$ , $\phi = 45^{\circ}$ , $\phi_1 = 45^{\circ}$ |      |        |     |      |     |      |      |      |     |
| Износ по задней поверхности<br>h <sub>ОПЗ</sub> мкм   | 329  | 323    | 219 | 218  | 313 | 327  | 356  | 371  | 481 |
| Температура резания θ,°С  | 580  | 660    | 750 | 780  | 820 | 850  | 880  | 925  | 960 |
| Нагрузка на ось Х %   | 19   | 20     | 18  | 16   | 7   | 7    | 7,5  | 8    | 9   |
| Нагрузка на ось Z %   | 30   | 27     | 26  | 27   | 21  | 22   | 22   | 20   | 21  |
| Нагрузка на шпиндель S1 %   | 41   | 35     | 34  | 35   | 20  | 22   | 22   | 23   | 23  |
| Коэффициент сплошности k  | 0,93 | 0,92   | 0,9 | 0,74 | 0,6 | 0,63 | 0,61 | 0,61 | 0,6 |

Очевидно, эти закономерности связаны с влиянием температуры резания на физические свойства обрабатываемого материала, а мерой обрабатываемости яв-

ляется коэффициент обрабатываемости:  $K_{O} \approx \frac{Sl_{1}}{Sl_{2}} = \frac{k_{S_{1}}}{k_{S_{2}}}$ 

где 
$$\hat{E}_{1} \approx \frac{S1_{1}}{S1_{2}} = \frac{34}{20} = \frac{k_{S_{1}}}{k_{S_{2}}} = \frac{0.9}{0.6} = 1,65$$

С повышением скорости резания коэффициент сплошности стружки изменяется так, как это представлено на рисунке 5.4. При скоростях резания примерно до 40 м/мин, коэффициент сплошности повышается, затем он имеет некоторую тенденцию к стабилизации, далее наблюдается некоторое повышение до скорости, которая примерно соответствует исчезновению нароста. Дальнейшее повышение скорости резания сопровождается быстрым, а затем медленным снижением и стабилизированием коэффициента сплошности. Такая картина изменения коэффициента сплошности объясняется тем обстоятельством, что большое влияние на величину пластической деформации, а значит и на вид сходящей стружки оказывает действительный передний угол инструмента. По мере увеличения действительного переднего угла можно получить постепенный переход от элементной стружки к сливной.

При малом переднем угле образование стружки сопровождается сильной пластической деформацией. С увеличением переднего угла, элемент стружки деформируется меньше, сдвиг его облегчается, и снимаемый слой сходит в виде сплошной ленты [72],[73]. Явление перехода сливной стружки в элементную объясняется снижением пластичности обрабатываемого материала (относительного удлинения δ,



Рисунок 5.4 – Зависимость коэффициента сплошности k, нагрузки на шпиндель S<sub>1</sub>(%), относительного износа по задней поверхности h<sub>огг</sub>, температуры резания θ, коэффициента обрабатываемости Ко, от скорости резания V при обработке стали 10X11H23T3MP на станке с ЧПУ VIKTOR turn II 26, S=0,4мм/об; Где уравнением полиномы для графика коэффициента сплошности k:  $k = 2E-08V^6 - 6E-06V^5 + 0.0009V^4 0,0692V^3 + 2,986V^2 - 67,712V + 631,28$ и величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9904;$ с уравнением полиномы для графика нагрузки на шпинделе  $S_1 = 9E-07 V^6 - 0,0003 V^5 + 0,0511 V^4 -$ 4,0746 V<sup>3</sup> + 180,26V<sup>2</sup> - 4196,2V + 40196 и величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9719;$ 

относительного сужения  $\psi$ ). При увеличении скорости резания происходит переход к более жестким условиям деформирования, сопровождаемый снижением пластичности обрабатываемого металла. А если запас пластичности металла недостаточен, то на какой-то стадии деформирования под действием возрастающих

напряжений он начнет разрушаться (скалываться).

# 5.4 Программа выбора условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов по виду стружки на основе температуры появления высокотемпературного охрупчивания

На основе разработанных методик разработан алгоритм и программа формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на основе температуры появления высокотемпературного охрупчивания, обеспечивающая условия максимальной работоспособности инструмента из ИТС.

Инструментальный материал и геометрия инструмента, а также режимы резания (S мм/об, Vм/мин, t мм) выбираются в зависимости от обрабатываемого материала, вида обработки и шероховатости поверхности [47],[102]. Для определения температуры высокотемпературного охрупчивания в базу данных программы забиваются значения зависимостей механических характеристик от температуры испытания. Все эти условия назначаются предварительно по справочным данным или по данным общей заводской программы и забиваются в базу данных авторской программы, а затем для расширения скоростного экспериментального диапазона устанавливается начальная экспериментальная скорость резания  $V_{3ксп.} = V_{спр.} - 10$  м/мин, и проводится обработка наружным точением на проход с плавным увеличением скорости резания, как показано на рисунках 5.5, 5.6.



Рисунок 5.5 – Алгоритм выбора условий максимальной обрабатываемости

Пользуясь возможностями токарного станка VIKTOR turn II 26/32, оборудованного автоматической системой с ЧПУ FANUC Series 18i – ТВ получают экспериментальные силовые значения нагрузки на шпиндель S<sub>1</sub> график полиномиальной зависимости которой S<sub>1</sub>=f(V) дифференцируется графически V<sub>0</sub>= $\frac{dS_1}{dV}$  в совместно работающей авторской программой по формированию условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов в процессе резания. Условия максимальной обрабатываемости достигаются в тот момент, когда с плавным увеличением скорости резания графическая зависимость становится V<sub>0</sub>= $\frac{dS_1}{dV}$  = tg α = 1 при этом условия максимальной обрабатываемости для стали 10X11H23T3MP в диапазоне от 55м/мин до 60м/мин, температура резания от 730°C до 820°C, при  $\gamma$ =10°,  $\alpha$ =10°,  $\phi$ =45°, t=1,5 мм, s=0,42 мм/об, BK8.



Рисунок 5.6 – Окно программы формирования условий максимальной обрабатываемости

Предлагается, что авторская программа по формированию условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов может быть отдельным коммерческим модулем приложения к общей заводской программе и будет встроена в систему управления станка с ЧПУ. Контроль температуры в зоне резания может быть осуществлён с помощью устройства (Пат. №142320 Российская Федерация, МПК G01K7/00), контроль силовых значений на шпинделе может быть осуществлён силовыми датчиками, встроенными в станок с системой ЧПУ, которая управляет скоростью резания по предложенному алгоритму, за счет изменения оборотов вращения шпинделя, тем самым формируя условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов.

# 5.5 Выводы

1. Разработано устройство для тарирования естественной термопары, измерения сил резания и температуры в процессе резания (Пат. №142320 Российская Федерация, МПК G01К7/00).

2. Разработана методика формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов по виду стружки и коэффициенту сплошности стружки, патент на изобретение: «Способ определения оптимальных режимов резания по виду стружки» № 2535839 МПК 7 В 23 В 1/00.

3. Разработан алгоритм и программа выбора условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов в процессе резания на основе температуры появления высокотемпературного охрупчивания.

4. Разработан метод формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных металлов при резании путем высокотемпературного охрупчивания, оцениваемых количественно коэффициентом Ко, из отношений изменяющихся значений потребляемой обрабатываемости мощности, коэффициента сплошности стружки k<sub>s</sub> во всем температурном диапазоне резания металлов, создаваемым изменением скорости резания.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные выводы и результаты:

1. Решена научно-техническая задача повышения производительности и формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании, имеющая значение для машиностроительных отраслей, определяющая уровень развития страны: энергетика; авиация; ракетостроение и др.

2. Разработано устройство, с помощью которого определяют условия максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов по виду стружки, получен патент на полезную модель №142320, МПК G01К7/00 (2006.01).

3. Доказана научная гипотеза о том, что температура максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов соответствует температуре высокотемпературного охрупчивания, при которой зависимости механических характеристик материалов (ψ, δ,) от температуры имеют минимальные значения.

4. Экспериментально установлена взаимосвязь вида стружки (сливная, суставчатая, элементная) с температурно-скоростным фактором и механическими характеристиками обрабатываемого материала.

5. Выявлена механика процесса образования стружки и зоны вероятного разрушения обрабатываемого материала сдвигом, отрывом, сдвигом и отрывом, вид которого определяется напряжённо-деформированным состоянием и изменяющимися свойствами обрабатываемого материала во всем температурно-скоростном диапазоне резания металлов и отражается изменением величины угла в диапазоне от 45° до 90° поверхности разрушения стружки от температуры.

6. Разработан метод формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных металлов при резании путем высокотемпературного охрупчивания, оцениваемых количественно коэффициентом обрабатываемости К<sub>0</sub>.

7. Разработаны РТМ «Метод формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании» и переданы для испытания и внедрения на предприятия ОАО «Сибнефнепровод Тюменский Ремонтно-Механический Завод», ОАО «Газтурбосервис», ЗАО Томский завод электроприводов.

# ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1157601 СССР, МКИ НО 1 КЗ 5/00. Устройство для электрической связи между неподвижным и вращающимся объектами / Ю.И. Некрасов, Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович (СССР). – №3573114/24-07; Заявл. 04.04.83; Опубл. 23.05.85, Бюл. № 19.

А. с. 901844 СССР, МКИ 001 К 7/02. Устройство для измерения температуры. / Ю.И. Некрасов, Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, В.С. Воронов (СССР). – № 2884590/18-10; заявл. 19.02.80; опубл. 30.01.82, Бюл. № 4.

3. А.с. СССР N 770661, МКИ З В 23 В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / А. Д. Макаров, А. М. Акбердин, Г. А. Шаров, В. Б.Долматов, В. С. Мухин (СССР). - № 2760629; Заявл 03.05.79 ; Опубл. 15.10.80, Бюл. № 25-08

4. А.с. СССР N 570455, МКИ 2 В 23 В 1/00. Способ определения оптимальных скоростей резания. / А. Д. Макаров, В. С. Мухин, Ю. М. Кичко, В. М. Кишуров (СССР). – № 2135399/08; заявл. 16.05.75; опубл. 30.08.77, Бюл. № 32.

 А.с. СССР N 841779, МКИ З В 23 В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания. / А. И. Хватов, А. И. Тананин, В. В. Никулин (СССР). – № 2832671/25-08; заявл. 29.10.79; опубл. 30.06.08, Бюл. № 24.

6. Аверьянова, И.Э. Обеспечение качества лезвийной обработки за счет варьирования величины главной составляющей силы резания./ И.Э.Аверьянова, О.И.Борискин, С.Я.Хлудов // Известия ТулГУ. Технические науки . 2010. №2-1. С.154-159.

7. Аверьянова, И.Э. Исследование процесса разрушения витка стружки в условиях токарной обработки пластичных материалов./ И.Э. Аверьянова, М.О. Борискина, Д.С. Зябрева, А.С. Хлудов // Успехи современного естествознания. 2012. №6. С.21-22.

8. Адаскин, А.М. Влияние скорости резания на стружкобразование при точении жаропрочных сплавов на основе хрома и никеля./ А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.А. Верещака, А.С. Верещака, В.В. Каширцев // СТИН. 2014. № 10. С. 23-27.

9. Адаскин, А.М. Обрабатываемость резанием жаропрочного сплава х65нвфт на основе хрома./ А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.С. Верещака, В.В. Каширцев, А.К. Кириллов // СТИН. 2013. № 7. С. 36-40.

10. Адаскин, А.М. Влияние модуля упругости обрабатываемого материала на соотношение составляющих силы резания при точении./ А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.С. Верещака, А.К. Кириллов // СТИН. 2014. № 6. С. 36-38.

11. Алтухова, В.В.Оптимизация конструкции передней поверхности сменной режущей пластины для колесотокарной обработки на основе математического моделирования стружкообразования / В.В. Алтухова, С.В. Бреев, Б.Я. Мокрицкий// Тенденции формирования науки нового времени. Сборник статей Международной научно-практической конференции: В 4 частях. Ответственный редактор А.А. Сукиасян. 2014. С. 44-48.

12. Андреев, В.Н. Совершенствование режущего инструмента. / В.Н. Андреев. – М., Машинострение, 1993. - 240 с.

13. Айзеншток, И.Я. Основные вопросы механики процесса резания металлов. Киев-Москва: Машгиз, 1950.

14. Армарего, И. Дж. А. Обработка металлов резанием. / И. Дж. А. Армарего, Браун Р. Х. пер. с англ. В. А. Пастунова. - М., «Машиностроение», 1977. – 325 с. ил.

15. Артамонов, Е.В. Определение температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин./ Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, А.М. Тверяков // СТИН № 11-2013

16. Артамонов, Е.В. Анализ возможности применения зависимостей физико-механических характеристик материалов от температуры для определения температуры максимальной обрабатываемости материала./ Е.В. Артамонов, Д.С. Василега // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. – 2008. – № 4 (73). – С. 56–58. – Библиогр.: с. 58.

17. Артамонов, Е.В. Установка для исследования деформаций и напряжений в режущей части инструмента из инструментальных сталей и сплавов интерферометрическим способом. / Е.В. Артамонов, М.Х. Утешев, Ю.И. Некрасов // Сборник «Приме-

нение прогрессивных методов металлообработки, как одно из важнейших средств ускорения темпов HTP». - Вып. 57. - Тюмень: ТГУ, 1976.

18. Артамонов, Е.В. Определение максимальной работоспособности инструментов при обработке деталей газотурбинных установок. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Известия высших учебных заведений «Нефть и газ». – 2013. – № 5. – С. 100–103\*

19. Артамонов, Е.В. Определение оптимальной скорости резания при точении сборными резцами по виду стружки. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // СТИН №11-2013. – № 11. – С. 17–19.\*

20. Артамонов, Е.В. Повышение работоспособности сменных режущих пластин сборных инструментов / Е.В. Артамонов, М.О.Чернышов, Т.Е. Помигалова, Д.В. Васильев // СТИН №7- 2014. – С. 19–21.\*

21. Артамонов, Е.В. О воздействии температуры резания на вид стружкообразования. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении. В 2 т. Том 2: Материалы IV научно-технической конференции. – Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2008. – 284 с. – С 9.

22. Артамонов, Е.В. Оптимизация режимов резания по виду стружкообразования. / Е.В.Артамонов, Д.В.Васильев // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы всероссийской научно-практической конференции. Т. 2; под ред. В.И. Бауэра. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2010. 268 с. – С 110 – 111.

23. Артамонов, Е.В. Определение рациональных режимов резания по виду стружки. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: материалы VI научнотехнической интернет-конференции с международным участием / отв. ред. Р. Ю. Некрасов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - 220 с. – С. 13 – 16.

24. Артамонов, Е.В. Определение максимальной работоспособности режущих элементов из твердого сплава при обработке деталей газотурбинных установок./ Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, А.Е. Макарчук// Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т.2 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 219 с.– С. 141-145.

25. Артамонов, Е.В., Резание металлов и температурный фактор, [Текст]: учебное пособие / Авт.: Е.В.Артамонов, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев / под общей ред. М.Х. Утешева. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 156 с.

26. Артамонов, Е.В. О взаимосвязи работоспособности режущих элементов и вида стружки / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Омский научный вестник. Серия приборы, машины и технологии. – 2013. – № 3(123). – С. 62–64.\*

27. Артамонов, Е.В. Оптимизация режимов резания по виду стружкообразования. / Артамонов Е.В., Васильев Д.В. // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы всероссийской научно-практической конференции. Т. 2; под ред. В.И. Бау-эра. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2010. 268 с. – С 110 – 111.

28. Артамонов, Е.В. Оптимизация процессов обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов на токарных станках с ЧПУ. учебное пособие / Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович – Тюмень: ТюмИИ, 1994. – 83 с.

29. Артамонов, Е.В. О взаимосвязи передней поверхности режущей пластины с видом стружки. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: материалы VI научно-технической интернет-конференции с международным участием / отв. ред. Р. Ю. Некрасов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - 220 с. – С. 48-52.

 Артамонов, Е.В. Взаимосвязь явлений при резании металлов и температурный фактор / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев : под общей ред.
 М.Х. Утешева. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 150 с. Допущено (УМО АМ)

31. Артамонов, Е.В. Оптимальная температура резания при обработке деталей из высоколегированных сталей. / Е.В.Артамонов, Д.В. Васильев // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Т. II / под ред. Е. А. Григорьян. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2010. - 272 с. – С 30 – 31.

32. Артамонов, Е.В. Оптимальная температура резания при обработке деталей из высоколегированных сталей. / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Т. II / под ред. Е. А. Григорьян. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2010. - 272 с. – С 30 – 31.

33. Артамонов, Е.В. Работоспособность инструментов и физикомеханические характеристики инструментальных твердых сплавов и обрабатываемых материалов. /монография / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, М.С. Остапенко, В.А. Шрайнер Под общей ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2008. – 160 с.: рис., табл. – Библиогр.: с. 143-157. – ISBN 978-5-91409-092-7.

34. Афонасов, А.И. Влияние температуры резания на характер стружкообразования./ А.И. Афонасов, А.А. Ласуков, А.А. Сапрыкин // Матеріали VIII Міжнародноі науково-практичноі конференції «Наука і освіта 2005». Т. 59. Техніка. - Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. - с.3-5. - 82с.

35. Барбышев, Б.В. Улучшение эксплуатационных свойств фрез на основе изучения напряженного состояния режущих пластин автореферат канд. техн. наук / Б.В. Барбышев. - Томск, 1993. - 20 с.

36. Бердников, Л.Н. Влияние температурного перепада на хрупкое разрушение зубьев твердосплавных фрез. / Л.Н. Бердников // Станки и инструмент. -1982. -№ 5. -с.23-24.

Бетанели, А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. / А.И.
 Бетанели - Тбилиси: Сабчота сакартвело, 1973. - 304 с.: ил.

38. Благовещенский А.В., Борискин О.И., Хайкевич Ю.А., Хлудов В.С., Хтудов С.Я. Управление качеством чистового точения на основе выбора рациональной формы и геометрических параметров передней поверхности режущей пластины / А.В. Благовещенский, О.И. Борискин, Ю.А. Хайкевич, В.С. Хлудов, С.Я. Хтудов //Тула: Гриф и К,2007,- 208 с.

39. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. / В.Ф. Бобров - М.: Машиностроение, 1975. -344с.

40. Бобров, В.Ф., Особенности образования суставчатой и элементной стружки при высокой скорости резания. / В.Ф. Бобров, А.И. Седельников // Вестник машиностроения. - 1976. - № 7. - с.61-66.

41. Борискин, О.И. Исследование работоспособности резцов, оснащенных СМП с видоизмененной формой режущей кромки и ротационными элементами. /

О.И. Борискин, В.В. Беляев, И.Е.Денисов, Ю.А. Хайкевич, С.Я. Хлудов // Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. - 168 с.

42. Васильев, Д.В. Определение условий максимальной работоспособности режущих элементов по виду стружки. / А.Р. Шевченко, Д.В. Васильев, К.В. Бакум, // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Т. 2; – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - 284 с. – С. 169 – 172.

43. Васильев, Д.В. Определение оптимальных условий резания./ Д.В. Васильев, А.Е. Макарчук, А.М. Тверяков / Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов II Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» в 4т. Т.1/Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 261 с.

44. Васин, С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 448 с.

45. Васин, С.А. Стружкодробление при точении./ С.А. Васин, В.В. Иванов – Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. 151 с.

46. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. / А.С. Верещака - М.: Машиностроение, 1993.

47. Верещака, А.С. Резание материалов: А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высш. шк., 2009. – 535 с.: ил.

48. Гольдшмидт, М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов./ М.Г. Гольдшмидт - Томск: ЗТТ, 2001.-180 с.

49. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский - М.: Высшая школа, 1985.-304 с.: ил.

50. Гречишников, В.А. Процессы и операции формообразования и инструментальная техника. учебник / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, С.В. Лукина, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе, В.И. Власов – М.:МГТУ «Станкин», Янус-К, 2006. 51. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

52. Даниелян, А. М. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов / А. М. Даниелян, П. И. Бобрик, Я. Л. Гуревич, И. С. Егоров - Москва : Машиностроение, 1965. - 308 с.

53. Ефимович, И.А. Повышение эксплуатационной эффективности инструмента на основе исследования напряженно-деформированного состояния и прочности его режущей части при различных видах стружкообразования. дисс. канд. техн. наук / И.А. Ефимович. – Томск. – 1999. – 198 с.

54. Жуков, А.М. Анализ факторов, влияющих на площадь соприкосновения стружки с передней гранью инструмента и на среднее уделенное нормальное давление./ А.М. Жуков // Вестник машиностроения, №9, 1953.

55. Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов./ Н.Н. Зорев
– М.: Машгиз, 1956.- 368 с.

Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания. / Н.Н.
 Зорев – М.: Машгиз, 1952.

57. Инструментальщик: энциклопедический справочник-каталог. В трёх томах. Том 1 / Я.А. Музыкант, Я. Арпаз, М.А. Волосова и др. / Под общ. ред. Я.А. Музыканта. – М.: Наука и технологии, 2009. – 464 с.; ил.

58. Инструментальщик: энциклопедический справочник-каталог. В трёх томах. Том 2 / Я.А. Музыкант, Я. Арпаз, Г.В. Борисовский и др. / Под общ. ред. Я.А. Музыканта. – М.: Наука и технологии, 2013. – 432 с.

59. Карпов, А.В. Определение обрабатываемости резанием конструкционных машиностроительных материалов на основе энергетических закономерностей стружкообразования // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: <u>www.science-education.ru/117-13311</u> (дата обращения: 18.04.2015). 60. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент. Учебник для вузов / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, А.Г.Схиртладзе, под редакцией С.В. Кирсанова. 3-е изд.– М.: Машиностроение, 2007.

61. Козочкин, М.П. Исследование связи вибраций при резании с качеством получаемой поверхности./ М.П. Козочкин, Н.В. Солис // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2009. №2. С. 16-23.

62. Козочкин, М.П. Особенности стружкообразования при лезвийной обработке с ультразвуковыми вибрациями./ М.П. Козочкин, Н.В. Солис // «Машиностроитель». 2011. Выпуск №2. С. 29-35.

63. Козочкин, М.П. Автоколебательный механизм формирования стружки./ М.П. Козочкин, Н.В. Солис // «Станочный парк». 2011. Выпуск №5. С. 48-52.

64. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения./ Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов.// Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2012, - 224 с.

65. Кривоухов, В.А.Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов / В.А.Кривоухов, С.В. Егоров, Б.М. Брунштсйн. - М.: Машгиз, 1961. 325с.

66. Кривоухов, В. А., Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки./ В. А. Кривоухов, П. Г. Петруха, Б. Е. Бруштейн, С. В. Егоров и др. / Под ред. проф. П. Г. Петрухи. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: «Машиностроение», 1974. - 616 с.

67. Куфарев, Г.Л. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. / Г.Л. Куфарев, К.Б. Окенов, В.Д. Говорухин // «Местеп» - Фрунзе, 1970. 170 с.

68. Кушнер, В.С. Основы теории стружкообразования: учеб. пособие./ В.С. Кушнер, В 2 кн.- Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996.

69. Кушнер В.С. Изнашивание режущих инструментов и рациональные режимы резания: учеб. пособие. / В.С. Кушнер – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. - 138 с.

70. Кушнер, В.С., Автоматизация пректирования технологии обработки дисков ГТД с использованием термомеханических характеристик процесса реза-

ния./ В.С. Кушнер, В.А. Горшенин, А.Н. Жавнеров // Омский научный вестник. – 2007. – № 2(56). – С. 127–128.

71. Лавров, Н.К. Завивание и дробление стружки в процессе резания./ Н.К. Лавров – М.: Машиностроение, 1971. 88 с.

72. Ласуков, А.А. Температура как определяющий фактор стружкообразования./ А.А. Ласуков, А.А. Моховиков // XXII Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. Миасс: МНУЦ, 2002.- с.81

73. Ласуков, А. А. Управление видом и формой стружки посредством ионной имплантации./ А. А. Ласуков, К.В. Зайцев // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 4-ой Всероссийской юбилейной науч.-практ. Конференции 23-24 сентября 2004года. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, - с.28-30. - 207с.

74. Лахтин, М. Ю. Металловедение и термическая обработка металлов. / М. Ю.Лахтин - М.: Металлургия, 1983. 362с.

75. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. / Т.Н. Лоладзе - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с.

76. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. / М.Г. Лошак – Киев: Наукова думка, 1984 – 327 с.

77. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. / А.Д. Макаров, 2-е изд.
 – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с

78. Макаров, В.Ф. Управление величиной оптимальной скорости резания при протягивании деталей ГТД на станке с ЧПУ./ В.Ф. Макаров, В.Р. Туктамышев // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, №4 (33). – С. 36 – 40.

79. Макаров, В.Ф. Интенсификация процесса протягивания труднообрабатываемых материалов: дис... на соиск. уч. ст. д-ра техн. Наук / В.Ф. Макаров. М.: Станкин, 1998.

80. Малкин, А.Я. Исследование статистических характеристик сборных резцов. / А.Я. Малкин, Ю.Ф. Вольвачев, В.В. Матвейкин // Исследование динамики технологического оборудования и инструмента. - М.: Из-во Университета Дружбы Народов, 1982. - с. 30-84. Марочник сталей и сплавов. / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А.
 Вяткин и др ; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989.

82. Марочник сталей и сплавов. / Под общ. ред. А.С.Зубченко 2-е издание доп. и испр. М.: Машиностроение 2003г. 784 стр. с ил.

83. Марочник сталей и сплавов.. / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; Под общей ред. А.С. Зубченко- М.: Машиностроение, 2001. 672 с.: ил.

84. Моисеев, В.Ф. Инструментальные материалы. монография / В.Ф. Моисеев, С.Н. Григорьев.-М.: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2005.

85. Мокрицкий, Б.Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала: моногр./ Б.Я. Мокрицкий. - Владивосток: Дальнаука, 2010. -232 с.

86. Мокрицкий, Б.Я. Повышение эффективности стружкообразования при колёсотокарной обработке./ Б.Я. Мокрицкий В.В. Алтухова, П.А. Саблин // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 2. С. 33-38.

87. Мокрицкий Б.Я. Управление деформационными процессами металла при колесотокарной обработке/ Б.Я. Мокрицкий, В.В. Алтухова, К.С. Бормотин, А.В. Артеменко // Технология металлов. 2013. № 6. С. 29-33.

88. Мокрицкий Б.Я. Схемы нагружения и методики оценки физикомеханических характеристик и эксплуатационных свойств инструментальных материалов./ Б.Я. Мокрицкий, В.В. Петров, В.В. Высоцкий, А.В. Артёменко// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. Т. 1. № 1 (13). С. 51-59.

89. Обрабатываемость материалов одно из важнейших технологических свойств, характеризующее совокупность качеств материала, которая определяет способность материал // URL:http://rudocs.exdat.com/docs/index-81619.html?page=2

90. Некрасов, Ю.И. Исследование технологической эффективности обработки труднообрабатываемых материалов на токарных станках с ЧПУ при управлении процессами нагружения режущей части инструмента. авто-реф. канд. техн. наук / Ю.И. Некрасов - Киев, 1981. - 24 с.

141

91. Новиков, Н.В. Влияние структурных факторов на трещиностойкость сплавов WC–CO при высоких температурах. / Новиков Н.В. и [др.] // Сверхтвердые материалы – -26. □ 1981. – №5. – С.20

92. Нодельман, М.О. Стружколомание при токарной обработке./ М.О. Нодельман – Челябинск: Книжное издательство, 1963. 120с.

93. Нодельман, М.О. Высокопроизводительное точение./ М.О. Нодельман
 – Челябинск Южно-Уральское книжное издательство. 1967г. 125 с.

94. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов./ Д. Норри. М.: Мир, 1981. 304 с.

95. Остафьев, В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. / В.А. Остафьев – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.: ил.

96. Панкин, А.В. Обработка металлов резанием./ А.В. Панкин – М.: Машгиз 1961г. 520с.

97. Патент РФ №2535839 Российская Федерация, МПК В23В1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / Артамонов Е.В., Васильев Д.В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU). - №2013113474/02; заявл. 26.03.2013; опубл. 20.10.2014 Бюл.№ 35

98. Патент РФ №142320 Российская Федерация, МПК G01К7/00. Устройство для тарирования естественной термопары, измерения сил резания и температуры в процессе резания / Артамонов Е.В., Васильев Д.В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU). - № 2013131205/28; заявл. 08.07.2013; опубл. 27.06.2014 Бюл.№18

99. Патент РФ №2531336 Российская Федерация, МПК В23В 27/16. Режущая пластина для черновой и чистовой обработки / Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Киреев В.В., Чернышов М.О.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU).

100. Патент РФ 2173611 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В23В1/00. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами / Е.В. Артамонов, В.Н. Кусков, Т.Е. Помигалова, В.М. Костив (РФ). - №99121439/02; заявл. 12.10.99; опубл. 20.09.2001, Бюл. № 26. – 4 с.

101. Патент РФ №2188746 Российская Федерация, МПК В23В1/00. Способ определения обрабатываемости материалов резанием / Закураев В.В., Закураев Е.В., Сизин С.А. - Заявка от 10.02.2000. Опубл. 10.09.2002

102. Петраков, Ю. В. Моделирование процессов резания: учебное пособие /Ю. В. Петраков, О. И. Драчёв. — Старый Оскол: ТНТ, 2011. — 240 с.

103. Петрушин, С.И. Теория несвободного резания материалов. Расчет напряженно-деформированного состояния в зоне резания./ С.И. Петрушин, А.В. Проскоков // Вестник машиностроения, – 2010.– №2. – С. 40-44.

104. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность при сложном напряженном состоянии. / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев – Киев: Наукова думка. – 1976. - 416 с.

105. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента. / Л.Г. Куклин - М.: Машиностроение, 1968. -140с.

106. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев – учеб. пособие для вузов. - М.: «Высш. школа» 1974. – 587 с.:ил.

107. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки и температуры на изношенном инструменте. / М.Ф. Полетика, В.Н. Козлов // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: Сборник научных трудов. - Томск: ТПУ, 1997. - с.18-21.

108. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. / М.Ф. Полетика - М.: Машиностроение, 1969. - 148 с.:ил.

109. Полетика, М.Ф. Теория резания, ч. 1. Механика процесса резания. учеб. пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2001 г.

110. Промптов, А.И.Качество поверхности, обработанной резанием. / Промптов А.И. Иркутск: ИПИ, 1978. - 60 с.

111. Пустовалов, Д.А. Методики оценки свойств материалов./ Д.А. Пустовалов, Б.Я.Мокрицкий, П.А.Саблин //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 6. С. 36-41.

112. Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский и [др.] - М.: Машиностроение, 1967. -416 с.: ил.

113. Режущий инструмент. Альбом ч.1. / Под ред. В.А. Гречишникова. — М.: «Станкин», 1996.

114. Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справочник / Я. Л. Гуревич [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1986. - 240 с. - Библиогр.: с. 240.

115. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. / А.Н. Резников, Л.А. Резников - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.: ил.

116. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин – М.: Машгиз, 1956. – 319 с. 14.

117. Розенберг, Ю.А. Резание материалов. учебник для вузов / Ю.А. Розенберг – Курган: изд. ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007 – 294 с.: ил.

118. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наук. думка, 1990. – 320

119. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты. / Г.Н. Сахаров и [др.] - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с.

120. Силин, С.С. Метод подобия при резании металлов. / С.С. Силин - М.: Машиностроение, 1979.- 152с.

121. Смирнов – Аляев Г.А., Розенберг В.М. Теория пластических деформаций металлов./ Г.А. Смирнов – Аляев, В.М. Розенберг – М.: Машгиз, 1956.

122. Сменные пластины и инструмент SANDVIK-МКТС. / Твердосплавный инструмент. – М., SANDVIK-МКТС, 2000.

123. Справочник по сопротивлению материалов. / под общ. ред. Писаренко Г.С. 2-е издание перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

124. Станюкович, А.В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов./ А.В. Станюкович - М.: Металургия, 1967. -200с.

125. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов./ В.К. Старков - М.: Машиностроение, 2009.640 с.ISB

126. Талантов, Н.В. Температурно-деформационная природа неустойчивости процесса резания./ Н.В. Талантов, Н.П. Черемушников // Технология и ав-
томатизация машиностроения: Сборник научных трудов волгоградского политехнического института. Выпуск VII.- Волгоград: Волгоградская правда, 1977.-с.3-16

127. Талантов, Н.В. Исследования и классификация видов неустойчивости процесса резания./ Н.В. Талантов, Н.П. Черемушников // Технология машиностроения и автоматизация производственных процессов: Сборник научных трудов. Волгоград: Волгоградская правда, 1978. - с. 49-69

128. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания./ Н.В. Талантов // Физические процессы при резании металлов: Сборник научных трудов. Волгоград: ВПИ, 1984. - с. 3-37

129. Ташлицкий, Н.И. Влияние механических свойств и теплопроводности сталей на их обрабатываемость./ Н.И. Ташлицкий – М.: Машгиз, 1952.

130. Ташлицкий, Н.И. Методы приближенного определения скоростей точения жаропрочных сталей и сплавов./ Н.И. Ташлицкий // «Вестник машиностроения», №10, 1959.

131. Тахман, С. И. Разработка единых моделей процесса изнашивания инструментальных твердых сплавов./ С. И. Тахман // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 56-59.

132. Тахман, С.И. О единстве температурных зависимостей механических свойств металлов в группах периодической системы. / С.И. Тахман, А.И. Битунов //Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 102. № 3. С. 363-368.

133. Тахман, С.И. К расчету износостойкости твердосплавного инструмента при резаниитруднообрабатываемых материалов./ С. И. Тахман, А. И. Битунов // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Физиология, психофизиология, психология и медицина. 2006. № 5-1. С. 161.

134. Трент, Е.М. Резание металлов. [пер. с англ]./ Е.М. Трент - М.: Машиностроение, 1980.-263 с.: ил.

135. Третьяков, И.П. Исследование прочности режущих кромок инструмента при ударно-циклических нагрузках. / И.П. Третьяков, Н.Ф. Киселев, Н.В. Яцук // Известия ВУЗов, М.: Машиностроение, №10, 1970. 136. Утешев, М.Х. Измерение в пластинах поперечных деформаций с высоким градиентом. / М.Х. Утешев, Ю.И. Некрасов, Е.В. Артамонов // Заводская лаборатория. - 1977.-№7.-с.889-891.

137. Утешев, М.Х. Напряженное состояние режущей части инструмента с округленной режущей кромкой. / М.Х. Утешев, В.А. Сенюков // Вестник машиностроения. - 1972.-№2.-с.70-73.

138. Фельдштейн, Э.И. Обрабатываемость сталей. М., Машгиз, 1953, 254 с.

Фрактография и атлас фрактограмм/ Справ, изд. Пер. с англ. / Под ред.
 Дж. Феллоуза. — М.: Металлургия, 1982. 489 с.

140. Хайкевич, Ю. А. Повышение эффективности чистового точения на основе выбора рациональной конструкции сменных многогранных пластин при прогнозировании процесса дробления стружки: Дисс. ... канд. Техн. Наук., 2007.

141. Хлудов, С.Я. Механизмы стружкодробления при точении. / Хлудов С.Я. //Тула: Изд-во ТулГУ, 2004,- 152 с.

142. Шаламов, В. Г. Прикладные задачи моделирования и оптимизации рабочей части инструмента: учеб. пособие. / В. Г. Шаламов; Челяб. гос. техн. ун-т, Каф. Станки и инструмент. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ,1996.-56 с.

143. Шлямнев, А.П. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы. / А.П. Шлямнев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 232 с.

144. Щуров, И.А. Расчет напряжений и деформаций метчиков. / И.А. Щуров // Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 1999. №2. с. 101-110

145. Astakhov, V. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear./ V. P. Astakhov, P. J. Davim// Machining Fundamental and Recent Advances, Ed. Springer, pp 29-57, 2008.

146. Constantin, C. Revision of actual stage in modeling of cutting processes./ C. Constantin, E. Strajescu //Proceedings in Manufacturing Systems.  $-2011. - T. 6. - N_{\odot}$ . 1. - C. 11-24.

147. Vasil'ev, D.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip./ E.V. Artamonov, D.V. Vasil'ev// Russian Engineering Researh. – 2014, Volume 34, Issue 6, pp 404-405\*

148. Vasil'ev, D.V. Extending Life of Replaceable cutting plates in composite tools/
E.V. Artamonov, M.O. Chernyshov, T.E. Pomigalova, D.V. Vasil'ev// Russian Engineering
Researh. – 2015, Volume 35, Issue 1, pp 61-63

149. Zorev, N.N., Untersuchung der Kontaktspannungen auf den Arbeitsflachen des Werkzeugs mit einer Schneidenabrundung/ N.N. Zorev, M. Ch. Uteschew, W.A. Senjukow // Annals of the CIRP vol. 20/1 1971. – C 31-32.

150. GARANT Справочник по обработке резанием. Материалы и теоретические основы. - 842 с.

151. Kadirgama, K. et al. Effect of milling parameters on frictions when milling hastelloy C-22HS: A FEM and statistical method //Trends in Applied Sciences Research.  $-2009. - T. 4. - N_{\odot}. 4. - C. 216-228.$ 

152. Klocke, F. Modeling of Cutting Processes. Finite element simulation of cutting processes. Simulation techniques in manufacturing technology. Lecture 8 - WZL/ Fraunhofer IPT. Available at: http://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/www \_content/en/f786439a4c53fb78c 125709f0055702f.htm (Accessed 12.12.2014).

153. Okoshi, M. Research on the Cutting Force./ M. Okoshi //Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research. – Tokyo. 1930. – Vol. 14. – P. 193 – 225.

154. Rosenhain, W. Inst. / W. Rosenhain, J. Ewen// Metals. 1912, № 2, p. 149.

приложения



<sup>(19)</sup> RU<sup>(11)</sup> 2 535 839<sup>(13)</sup> C2



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

#### KU 2 535 835 (51) MIIK

| B23B | 1/00  | (2006.01) |
|------|-------|-----------|
| B23B | 25/06 | (2006.01) |

#### ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

| (21)(22) Заявка: 2013113474/02, 26.03.2013<br>(24) Дата начала отсчета срока действия патента:<br>26.03.2013 | (72) Автор(ы):<br>Артамонов Евгений Владимирович (RU),<br>Васильев Дмитрий Вячеславович (RU) |          |
|--|--|----------|
| Приоритет(ы):  | (73) Патентообладатель(и):   |          |
| (22) Дата подачи заявки: 26.03.2013  | образовательное учреждение высшего   | -        |
| (43) Дата публикации заявки: 20.10.2014 Бюл. № 29  | профессионального образования "Тюменский<br>государственный нефтегазовый университет"        | ĉ        |
| (45) Опубликовано: 20.12.2014 Бюл. № 35  | (ТюмГНГУ) (RU)   |          |
| (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 770661 A1 ,15.10.1980. RU 2179910                 |  | N        |
| C1, 27.02.2002. RU 2064370 C1, 27.07.1996. RU  |  | 5        |
| 2215615 C2, 10.11.2003. US 6477927 B1,   |  | ω        |
| 12.11.2002. GB 2257269 A, 06.01.1993   |  | <b>U</b> |
| Адрес для переписки:   |  | 8        |
| 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, 38,  |  | ω        |
| ТюмГНГУ, управление НИР, Ивановой Л.С.   |  | 9        |

### (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

#### (57) Pedepar:

Изобретение относится к области обработки металлов резанием, в частности к способу определения оптимальной скорости резания при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе для твердосплавного инструмента. По результатам кратковременных испытаний определяют температуру резания, при которой происходит изменение вида стружки из сливной в элементную. На графике зависимости температуры резания от скорости резания по этой температуре определяют оптимальную скорость резания. Технический результат заключается в сокращении трудоемкости определения оптимальной скорости резания на основе стандартных кратковременных испытаний при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе для твердосплавного инструмента. 1 ил., 1 табл. C 2

2

C

6

3

8

5



斑 斑 斑 斑 斑 斑 斑

斑

密

斑

斑

斑

寮

斑

斑

斑

密

斑

緻

密

密

濲

斑

密

盗

發發

發發

密

盗

密

**班政政政政政政政政**政

發發

嶽

<u>资 资 资 资 资 资 资</u>

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

密

密

密

斑

斑

斑

發發路

發發發

斑

密

斑

密

斑

**密**密

斑

斑

斑

發發

斑

發發

斑斑

斑

斑斑

密

№ 2531336

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

## РЕЖУЩАЯ ПЛАСТИНА ДЛЯ ЧЕРНОВОЙ И ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ

Патентообладатель(ли): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ) (RU)

Автор(ы): см. на обороте

Заявка № 2013129883

Приоритет изобретения **28 июня 2013 г.** Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **22 августа 2014 г.** Срок действия патента истекает **28 июня 2033 г.** 

> Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

资政政政政政政政政权政权政权政权政权政权政权政策委任



FOCT 1497-84 C. 23

Например, при испытании образцов с начальной расчетной длиной  $l_0=5,65$   $\sqrt{F_0}$  и  $l_0=11,3$   $\sqrt{F_0}$  относительное удлинение после разрыва обозначают б5, б10 соответственно.

кого образца после разрыва измеряют минимальный диаметр d<sub>x</sub> в 4.11. Для определения относительного сужения  $\psi$  цилиндричесдвух взаимно перпендикулярных направлениях.

a

Измерение минимального диаметра  $d_{\rm k}$  проводится штангенцирку лем с отсчетом по нониусу до 0,1 мм.

По среднему арифметическому из полученных значений вычис-ляют площадь поперечного сечения образца после разрыва  $F_{\rm k}$ . 4.11.1. Относительное сужение после разрыва ( $\psi$ ) вычисляют по

формуле

$$\mu = \frac{(F_0 - F_{\rm x}) \cdot 100}{F_0} \, .$$

4.12. Округление вычисленных результатов испытаний проводят Таблица 2 в соответствии с табл. 2.

Номер образца

| Округлание                          |  | До 1,0 (до 0,1)   | До 5,0 (до 0,5)  | До 10 (до 1)   |   | До 0,01 · 10 <sup>5</sup><br>(до 0,01 · 10 <sup>4</sup> )     |   | До 0,1<br>До 0,5                             | До 1,0   |
|-------------------------------------|--|---|--|--|---|---|---|--|--|
| Интервал значений<br>характеристики |  | До 100 (до 10,0)  | Св. 100 до 500<br>(св.10 до 50)  | Св. 500 (св. 50)   |   | $1,00-2,50 \cdot 10^{5}$<br>(1,00-2,50 $\cdot 10^{4}$ )       |   | До 10,0<br>Св. 10,0 до 25,0                  | Св. 25,0   |
| Характеристика механических свойств | Предел пропорциональности,<br>Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ) | Предел упругости, Н/мм <sup>2</sup><br>(кгс/мм <sup>2</sup> ) | Предел текучести физический,<br>Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ) | Предел текучести условный,<br>Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ) | Временное сопротивление, H/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ) | Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup><br>(кгс/мм <sup>2</sup> ) | Относительное равномерное уд-<br>линение, % | Относительное удлинение,<br>после разрыва, % | Относительное сужение площа-<br>ди поперечного сечения после раз-<br>рыва, % |

(Измененная редакция, Изм. № 2).





ПРИЛОЖЕНИЕ 4

1,5 1,5 1,5

8 50 4 30

8 25 20 15

9

σh.

|              | Наименование ста-<br>аей и сплавов   | Химический<br>состав   | Типовые<br>марки                               | Рабечая техпература, "С |   | Скорости резливи<br>при обработке                                 |                                    |  |  |                                  |                                  |   |  |
|--------------|--|--|--|-------------------------|---|---|------------------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------------------|---|--|
|              |  |  |  |                         | точение   |   | фрезерование                       |  |  | , NO                             | e.,                              | HUB9<br>HOUDE-<br>HOUDE-                        |  |
| Группа стали |  |  |  |                         | its piro noe  | 41670600  | Toputosoe                          | концевое   | сверление                              | твердым спла<br>м/жам            | быстрорежущ<br>сталью. м/мы      | K CTAJN 45<br>K CTAJN 45<br>X 18H9T             |  |
| 1            | Теплостойкие<br>хромистые стали<br>перлитного и<br>мартенситного<br>клиссов                                  | Cr=5÷6%<br>Mo=0,5÷0,6%<br>Si=0,5÷2.0%                                    | X6C<br>X7CM<br>9H415                           | 500-600                 | T5K10<br>BK8  | T15K6<br>T30K4  | T1586                              | Вантовые<br>пласт.<br>Т15К6<br>Т5К10<br>ВК8            | -                                      | }                                | 50-60                            | 0,8 1,6   |  |
| 11           | Нержавеющие<br>высокохромистые<br>стали ферритного<br>и мартенситного<br>классов                             | Сг>10÷13% и<br>др. летирую-<br>щие элемен-<br>ты до 1→2%                 | 1X13, 2X13<br>1X17H2<br>3//961<br>9//56, 9/165 | 530580                  | T5K10<br>BK8  | TISKG   | HRC < 40<br>BK8<br>HRC>40<br>T15K6 | Винтовые<br>пласт.<br>ВК8 и<br>Р18                     | HRC<40<br>P18<br>HRC>40<br>BK8<br>BK6M | }140-160                         | 3545                             | 0,65 1,3  |  |
| 111          | Нержавеющие<br>и жаропрочные<br>стали аустенитного<br>и переходного<br>аустенитно-мартен-<br>ситного классор | Сг., NI и<br>малое количе<br>ство др. ле-<br>гарующих<br>элементов       | 1X18H9T<br>ЭИ811<br>ЭИ904<br>ЭИ905             | -                       | t>10<br>s <sub>8</sub> ≥0,8<br>BK8P<br>s <sub>8</sub> =0,5−0,8<br>BK8<br>T5K10, | BKSM<br>TI5K6<br>BK8  | BK6M<br>BK8<br>P18                 | Buitomae<br>naner,<br>BK8 n<br>P18<br>P10K5Φ5<br>P14Φ4 | P9K5<br>P18K5Ф5<br>P18                 | 120-150<br>100-120<br>100-125    | 2535<br>2030<br>2535             | 0,5 1,0<br>0,43 0,85<br>0,45 0,9                |  |
| IV           | Жаропрочные<br>и окалиностойкие<br>сложнолегирован-<br>вые стали зусте-<br>интного класса                    | Большое<br>кол-во<br>Сг. Ni и др.<br>легирующих<br>злемевтов<br>(Мп, Мо) | 344481<br>34/3%<br>34/835<br>34/654<br>34/696  | 650                     | BK8<br>BK6M   | σ <sub>B</sub> >75<br>T15K6<br>σ <sub>B</sub> <75<br>BK6M<br>BK6M | P18<br>BK6M<br>BK8                 | Р9К5<br>Р16К5Ф<br>Р18                                  | P9K5<br>P18                            | 80—90<br>50—60                   | 15-25                            | 0,30 0,6<br>0,23 0,40                           |  |
| v            | Жаропрочные<br>деформируемые<br>сплащи на желе-<br>зо-никелевой и<br>никелевой осно-<br>вах                  | Сложнолеги-<br>рованные  | ЭН437<br>ЭН787<br>ЭП202<br>ЭИ827<br>ЭН867      | 750-800                 | Обычное<br>ВК8<br>ВК6М<br>Преры-<br>вистое<br>Р10К5Ф5<br>Р9К5, Р18              | ВК6М  | P18                                | P18  | P9K5<br>P10K5Φ5<br>P18                 | 40-45<br>22-25<br>20-23<br>15-18 | 8-12<br>9-12<br>6-11<br>5-10     | 0,16 0,33<br>0,12 0,24<br>0,11 0,2<br>0,75 0,15 |  |
| VI           | Жаропрочные<br>литейные сплавы<br>на никелевой ос-<br>вове   | Сложнолеги-<br>ровлиные  | ВЖ36-л2<br>ЖС6-к<br>ЖС3-ДК                     | 900 и<br>1000           | ВК8<br>ВК6М<br>Прерывис-<br>тое<br>Р9К5, Р18                                    | вқбм  | ВК6М<br>ВК8                        | Винтовые<br>пласт.<br>ВК8                              | BK8<br>BK6M                            | 8—10                             | 4-6                              | 0,04 0,08                                       |  |
| VII          | Спланы на ти-<br>тановой основе  | Ti   | BT1<br>BT5<br>BT3-1<br>BT6<br>OT4-2            | 300500                  | BK6M<br>BK4<br>BK8  | BK2<br>T15K6  | BK4<br>BK8                         | BK8  | P18<br>BK6M                            | 80                               | 25-30<br>15-20<br>15-18<br>12-15 | 0,45 0,90<br>0,25 0,50<br>0,20 0,40             |  |
| VIII         | Тугопланкие<br>металлы и их<br>спланы  | W.<br>Mo,<br>Nb<br>Ta  | вольфрам<br>молибден<br>ниобий<br>тантал       | 2000<br>1700<br>1000    | BK8<br>PI8, BK6M<br>PI8   | BK8<br>BK6M<br>P18  | BK6M<br>BK6M<br>P18                | P18<br>P18   | P18<br>P18                             | 25—40<br>90—120<br>70—100        | 5—8<br>12—16<br>30—50            | 0,100,20<br>0,200,40<br>0,400,80                |  |

Классификация нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов по обрабатываемости их резание

Я. Л. Гуревич [86]



АКТ ССТРАНИИ СТАТУРБОССРВИС» АКТ СТАТУРБОССРВИС» АКТ ССТРАНИИ СТАТУРБОССРВИС» ССТРАНИИ СТАТУРБОССРВИСА ССТРАНИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТУРБОССРВИСА ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИРИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИРИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИРИИ СТАТИИ СТАТИРИИ СТАТИРИИ ССТРАНИИ СТАТИРИИ СТАТИРИ СТАТИРИИ СТАТИРИ

от 09.01.2014 года

О внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Васильев Дмитрий Вячеславович

Акт о том, что результаты диссертационной работы Васильева Д.В. «Оптимизация процесса механической обработки по виду стружки» переданы для внедрения в ПИИ ОАО «Газтурбосервис» в виде «Руководящие технические материалы», в которые вошли:

> Метод определения оптимальной скорости резания при обработке жаропрочных сталей для твердосплавного инструмента.

Использование указанных результатов позволяет: определить оптимальные режимы резания при освоении новых изделий в производстве или модернизации существующих технологий; сократить затраты при постановке на производство новых изделий за счет исключения ошибок при выборе режимов резания на станках с ЧПУ, а так же сокращения периода производственных испытаний.

Материалы для внедрения были созданы на основании новых результатов исследований по следующим направлениям:

«Определение оптимальных условий при резании на станках с ЧПУ» «Определение условий максимальной обрабатываемости материалов»

Начальник ТБЦ — Панфилов М.В. Начальник цеха №36: Панфилов М.В. Золотухин А.С.



Ф 3.1-01-05/06 Акционерная компания по транспорту нефти "Транснефть"

# Закрытое акционерное общество "Томский завод электроприводов"

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СООТВЕТСТВУЕТ ISO 9001 СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТИ СООТВЕТСТВУЕТ BS OHSAS 18001

Причальная улица,14 «А», г. Томск, 634024 тел. (3822) 530671, 276310, тел./факс (3822) 276312, 276313 http://www.tomzel.ru



АКТ о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Васильева Дмитрия Вячеславовича

Настоящим актом подтверждается, что на предприятии ЗАО «Томский завод электроприводов» АК Транснефть Васильевым Дмитрием Вячеславовичем проведена работа по испытанию и внедрению способа оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки

Применяемый способ оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки обеспечивает высокую производительность обработки.

Испытание и внедрение способа оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки показали:

Снижение количества отказов режущих пластин из инструментального твердого сплава в результате поломки в 2,5 раза;

Повышение производительности в 1,5 раза.

Главный технолог

Радаев В.Н.

Начальник механического цеха

Павлов О.А.



# ТЮМЕНСКИЙ РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "СИБНЕФТЕПРОВОД"

УТВЕРЖДАЮ: Директор ТРМЗ ОАО «Сибнефтепровод» Н.Ю. Прокопенко 2013 г

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Васильева Дмитрия Вячеславовича

Настоящим актом подтверждается, что на предприятии АК "Транснефть" ОАО "Сибнефтепровод" Тюменский Ремонтно-Механический Завод Васильевым Дмитрием Вячеславовичем проведена работа по испытанию и внедрению способа оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки, в которую вошли:

 Методика оптимизации процесса механической обработки резанием по виду стружки;

 Технологические рекомендации по определению условий максимальной работоспособности режущих пластин из инструментального твердого сплава по виду стружки.

Начальник ТО

Al to

Барабаш Д.А.

Начальник МЦ

Муратов И.В.

Следствие I. При неизменной паре инструментальный - обрабатываемый материал точкам минимума зависимостей интенсивности износа от скорости резания, для инструментов вне зависимости от комбинации геометрических параметров инструмента (г,  $\varphi$ ,  $\varphi$ 1,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$  и др.), соответствует постоянная оптимальная температура резания, несмотря на то, что оптимальные скорости резания при этом изменяются кардинально, как, например, показано на рисунке 6.1 [69]. На основании рассмотренного следствия можно сделать вывод о том, что оптимальная температура резания связывает между собой геометрические параметры инструмента и оптимальные режимы резания.





Следствие II. Оптимальная температура резания остается постоянной вне зависимости от того, проводится обработка материалов резанием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) или применяются различные СОЖ, подводимые в зону резания различными способами. Данное следствие может иллюстрировать рисунок 6.2.



Рисунок 6.2 - Доказательство второго следствия по данным А.Д. Макарова[69]

Следствие III. Оптимальная температура резания остается постоянной вне зависимости от комбинаций температур начального подогрева обрабатываемого материала, толщины срезаемого слоя и скоростей резания. Исследования, подтверждающие это следствие для токарной обработки, приведены на рисунке 6.3, а для фрезерования - на рисунке 6.4.

Это же следствие отражает вывод о том, что максимальная размерная стойкость инструмента, соответствующая оптимальной температуре резания, может обеспечиваться с одинаковым результатом как подогревом заготовки, так и интенсификацией режимов резания.



Рисунок 6.3 – Доказательство третьего следствия по данным А.Д. Макарова при токарной обработке [69]



Рисунок 6.4 – Доказательство третьего следствия по данным А.Д. Макарова при фрезерной обработке [69]

Следствие IV. Оптимальная температура резания остается постоянной вне зависимости от варьирования диаметров обрабатываемой поверхности при точении и растачивании, несмотря на существенное изменение оптимальных скоростей резания. Исследования, подтверждающие это следствие при точении, приведены на рисунке 6.5, а при растачивании - на рисунке 6.6.



Рисунок 6.5 – Доказательство четвертого следствия по данным А.Д. Макарова при точении [69]



Рисунок 6.6 – Доказательство четвертого следствия по данным А.Д. Макарова при растачивании [69]

Следствие V. Оптимальная температура резания остается постоянной вне зависимости от варьирования твердости и структуры обрабатываемого материала [57], несмотря на существенное изменение оптимальных скоростей резания. Исследования, подтверждающие это следствие, приведены на рисунке 6.7.

Следствие VI. Оптимальная температура резания (при неизменной паре инструментальный - обрабатываемый материал) остается постоянной при использовании сверл с различной геометрией режущей части.

Следствие VII. Кривые  $h_{O\Pi}=f(r)$ ,  $h_{O\Pi}=f(s)$ ,  $h_{O\Pi}=f(\theta_{\Pi})$ ,  $h_{O\Pi}=f(d)$  и др., выражающие влияние радиуса вершины резца, толщины среза, температуры начального подогрева обрабатываемого материала, диаметра обрабатываемой поверхности на интенсивность износа (или длины пути резания), при постоянной скорости обработки могут быть возрастающими, убывающими, вогнутыми или выпуклыми. Характер этих кривых зависит от приближения или удаления температуры обработки  $\theta$ , от оптимальной температуры резания  $\theta_0$ , соответственно определяется влиянием варьируемого параметра на температуру резания. Исследования, подтверждающие это следствие, приведены на рисунках 6.8-6.10.



Влияние скорости резания (а) и температуры резания (б) на интенсивность износа резца при точении деталей с различной структурой и твердостью из стали ХВГ резцом из сплава ВК8: t = 0,25 мм; s = 0,10 мм/об

Рисунок 6.7 – Доказательство пятого следствия по данным А.Д. Макарова при то-



Рисунок 6.8 – Доказательство седьмого следствия по данным А.Д. Макарова при изменении радиуса закругления вершины резца [69]



Рисунок 6.9 – Доказательство седьмого следствия по данным А.Д. Макарова при изменении диаметра детали при точении [69]

Установленные А.Д. Макаровым следствия из положения о постоянстве оптимальной температуры резания, нашедшие подтверждение в большом количестве экспериментальных исследований, расширили и углубили выявленную область действия рассмотренного положения, еще раз подтвердив, что оптимальная температура резания является фактором, связывающим все параметры процесса обработки материалов резанием.



Рисунок 6.10 – Доказательство седьмого следствия по данным А.Д. Макарова при изменении температуры предварительного подогрева детали [69]

Из рисунка 6.5 следует, что оптимальная температура резания при токарной обработке деталей различных диаметров инструментом оснащенным твердым сплавом ВК6М, имеет постоянную величину равную  $\theta_0 = 740$  °C. Таким образом, приходим к выводу, что при тех величинах t, S при токарной обработке деталей из стали 11X11H2B2MФ резцами из твердого сплава T15K6 при различных значениях пути резания оптимальная температура будет иметь постоянное значение равное $\theta_0$ =850 °C.

В результате исследований представленных на рисунке 6.11, влияние применяемой СОЖ и скорости резания на температуру в зоне резания и значение интенсивности износа инструмента из твердого сплава ВК8 при токарной обработке деталей из материала ХН51ВМТЮКФР следует, что использование различных СОЖ не меняет экстремальный характер кривых  $h_{OII3}=f(V)$ . Причем величина интенсивности износа инструмента минимальна и с применением различных СОЖ и без СОЖ при разных значениях оптимальных скоростей резания, им соответствует одинаковое среднее значение оптимальной температуры контакта, которая равна 740 °С [95].



о – всухую; □ – СОЖ Э2;
 ∆ – СОЖ ОМЭА
 материал детали
 ХН51ВМТЮКФР;
 резец из ИТС ВК8;
 t = 0,50 мм; s = 0,09 мм/об
 Рисунок 6.11 – Влияние скорости
 резания и применяемой СОЖ на
 температуру резания и интенсивность износа инструмента

Повышение производительности обработки труднообрабатываемых материалов резанием можно осуществить путем специального подогрева срезаемого слоя. В результате подогрева снижаются значения механических свойств, уменьшаются контактные нагрузки на режущий инструмент, снижается вероятность сколов и выкрашиваний режущей части, а в некоторых случаях уменьшается и интенсивность износа инструмента. Не влияет на изменение экстремального характера графиков l=f(V) и  $h_{O3}=f(v)$  специальный подогрев срезаемого слоя материала, а только сдвигает точки экстремума в область более низких скоростей резания, как показано на рисунке 6.12. Минимальным значениям интенсивности износа режущего инструмента при предварительном подогреве срезаемого слоя обрабатываемого материала до разных температур  $\theta_{\Pi}$ , соответствует одинаковой постоянной оптимальной температуре резания. Помимо этого, разным сочетаниям температур специального подогрева обрабатываемого материала, сечений срезаемого слоя и скорости резания, соответствующие меньшим значениям интенсивности износа режущего инструмента и большей его стойкости, соответствует одинаковая оптимальная температура резания, как показано на рисунке 6.13. Зависимости пути резания (до критериального значения) от температуры θ<sub>Π</sub> подогрева обрабатываемого материала при u=const, возможно будут монотонно возрастать, монотонно убывать или иметь экстремальный характер, как показано на рисунке 6.13. На характер графиков l=f( $\theta_{\Pi}$ ) влияет $\theta_{\Pi}$  температура резания. Подогрев срезаемого слоя при обработке труднообрабатываемых материалов целесообразно использовать лишь при обработке на скорости резания меньшей оптимальной V<sub>0</sub>, как показано на рисунке 6.14.

Один из наиболее важных критериев правильного выбора условий резания, тем более при обработке жаропрочных материалов, это является качество обработанной поверхности.

Несмотря на это методика оптимизации режимов резания, предложенная Макаровым А.Д., требует дорогостоящих стойкостных испытаний и не учитывает проблемы правильного выбора инструментального твердого сплава.



ИТС ВК8, s = 0,11 мм/об

а – ХН55ВМТФКЮ; t = 0,25 мм; о -  $\theta_{\pi}$  = 20° C;  $\Delta$  -  $\theta_{\pi}$  = 200° C;  $\Delta$  -  $\theta_{\pi}$  =550° C;  $\delta - ЖС6K; t = 0,50$  мм; о -  $\theta_n = 20^\circ$  C;  $\Delta$  -  $\theta_n = 300^\circ$  C;  $\Delta$  -  $\theta_n = 500^\circ$  C Рисунок 6.12 – Влияние скорости резания на относительный поверхностный износ, путь резания и среднюю температуру контакта при обработке деталей из жаропрочных сплавов с подогревом



ИТС ВК8 a - XH77THO; t = 0,25 мм;  $h_3 =$ 0,25 мм; б - ЖС6К; t = 0,50 мм;  $h_3 = 0,40$ MM Рисунок 6.13 – Влияние тем-

Lim 80

60

40

20

15

10 0

. мкм/10<sup>3</sup>см<sup>2</sup>

пературы предварительного подогрева на путь резания и среднюю температуру в зоне резания;



t = 0,25 mm; s = 0,11 mm/o6; h<sub>3</sub> = 0,25  
mm; 
$$\circ - \theta_{\pi} = 20$$
 °C;  $\Box - \theta_{\pi} = 220$  °C; • -  $\theta_{\pi} = 550$  °C

Рисунок 6.14 - Влияние скорости резания на период стойкости резца из сплава ВК8 при точении деталей из жаропрочного сплава ХН55ВМТФКЮ с подогревом;