

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт машиностроения, материалов и транспорта

На правах рукописи

Паневин Сергей Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ
ТОЧЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Направление подготовки: 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность: 15.06.01_05 «Технология машиностроения»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Паневин Сергей Сергеевич

Научный руководитель: к.т.н., доцент

Любомудров Сергей Александрович

Санкт-Петербург
2019

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института металлургии машиностроения и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШ/зав. Кафедрой *Любомудров Сергей Александрович,*
к.т.н, доц.

Научный руководитель: *Любомудров Сергей Александрович,*
к.т.н, доц.

Рецензент: *Максаров Вячеслав Викторович,*
д.т.н, профессор, СПбГУ, декан
электромеханического факультета,
заведующий кафедрой машиностроения.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Жаропрочные материалы на основе титана - это сплавы, которые в XXI веке нашли свое применение в ракетной и аэрокосмической техники, работающей в экстремальных условиях.

Современные предприятия аэрокосмической промышленности решают сложные задачи при проектировании новых деталей, а именно снижение себестоимости изготовления деталей, путем снижения затрат на производство, а также упрощение конструкции изготавливаемых деталей. Применение материалов нового поколения позволяет деталям эффективно работать в условиях циклических нагрузок при высоких температурах.

Новым видом материалов, повышающих эксплуатационные характеристики деталей, являются интерметаллидные соединения (интерметаллиды) на основе титана.

Интерметаллиды – вид материалов, занимающих по своей структуре промежуточное положение между керамикой и жаропрочными сплавами.

Они имеют сложную кристаллическую решетку с наличием в ней 30% ковалентной составляющей, что и делает данные сплавы уникальными в своих физико-механических свойствах (низкая плотность и высокая жаропрочность, высокая износостойкость по сравнению с традиционными жаропрочными материалами).

Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля называют материалами нового поколения за счет их уникального комплекса физико-механических свойств.

Проведенные работы в ОАО «НПО "Композит"» дали возможность применять интерметаллидные сплавы на основе соединений Ti_3Al , $TiAl$ и $NiAl$ во вновь создаваемых деталях аэрокосмической, автомобильной, ракетно-космической и авиационной техники .

Однако проблема создания этих сплавов, включая выбор композиции и выплавку, менее сложная по сравнению с проблемой дальнейшей обработки заготовок из интерметаллидных сплавов.

Выбор технологии изготовления, оборудования, режущего инструмента – проблема изготовления деталей из интерметаллидных сплавов. Благодаря прогрессу в области технологических процессов производства деталей становится возможным в ближайшем будущем практическое применение интерметаллидных сплавов в изготовлении деталей аэрокосмической промышленности.

Большая проблема возникает в лезвийной обработке интерметаллидных сплавов из-за их высокой прочности и твердости. Выбор оборудования, инструмента и режимов резания – задача, над которой работают многие предприятия нашей страны.

Целью диссертации является повышение стойкости режущего инструмента при обработке жаропрочных сплавов, в частности ВТ41.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели для подбора оптимальных режимов резания при которых стойкость режущего инструмента будет максимальной при обработке нового вида титанового сплава ВТ-41.

2. Разработка установки для проведения экспериментов, позволяющей фиксировать размерный износ инструмента в зависимости от пройденного пути резца в металле.

3. Проведение однофакторных и многофакторных экспериментов на титановом сплаве ВТ8 для проверки математической модели.

4. Проведение однофакторных и многофакторных экспериментов на титановом сплаве ВТ41.

5. Разработка практических рекомендаций повышения стойкости режущего инструмента при точении сплава ВТ41.

Методы исследований: обзор, экспериментальное исследование, анализ полученных данных, моделирование с использованием программного обеспечения Компас 3d, Microsoft Exel, Mathcad.

Научная новизна работы:

Новизна работы заключается в создании математической модели, позволяющей определять рациональные режимы резания для обработки принципиально нового титанового сплава ВТ41.

Практическая ценность работы заключается в подборе рациональных режимов резания титанового сплава ВТ41 на основании математической модели для повышения стойкости режущего инструмента, вследствие чего снижается себестоимость изготавливаемых деталей. Данная модель особенно актуальна в авиакосмической промышленности, где обрабатывают данный сплав.

Обоснованность научных положений и выводов работы обеспечивается тем, что для подтверждения математической модели предварительные эксперименты были проведены на всеми известном титановом сплаве ВТ8, который давно обрабатывается на многих предприятиях.

Экспериментальные исследования проводились на установке с аттестованными измерительными приборами, что позволило соискателю получить достоверные результаты.

Положения выносимые на защиту:

- математическая модель относительного износа резца;
- методика расчета рациональных режимов резания для обработки титанового сплава ВТ41.

Апробация работы и публикации. Результаты данной работы опубликованы в четырех статьях в регулярных изданиях и сборниках докладов на конференциях по теме работы, индексируемых в РИНЦ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практические результаты исследования.

В первой главе проведен анализ существующих методов повышения стойкости режущего инструмента при точении жаропрочных сплавов. Исследованы труды Д.Г. Евсеева, А.С. Верещаки, Ю.Г. Кабалдина, Л.В. Огорокова, В.Н. Подураева, Н.И. Резникова, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова, М.В. Шатерина и др.

Из проведенного анализа существующих источников можно сделать вывод что проблема повышения стойкости режущего инструмента при обработке жаропрочных титановых сплавов, в частности ВТ41, является актуальной.

Во второй главе

Разработана методика экспериментов. Первый этап экспериментальных исследований заключается в проведении ряда однофакторных экспериментов для определения характера зависимости параметров оптимизации от факторов и определения их диапазона варьирования. Второй этап – проведение полного многофакторного эксперимента для определения коэффициентов уравнения математической модели. Для второго этапа проведено планирование экспериментальных исследований, для определения необходимого числа опытов, обеспечивающих необходимое и достаточное решение поставленной задачи.

В качестве факторов выбраны: скорость резания V , подача s , радиус при вершине режущей пластины R .

В качестве параметров оптимизации приняты: износ инструмента.

В качестве режущего инструмента выбраны:

- режущая пластинка Sandvik Coromant DNMG 150404-SF H13A;
- державка Sandvik Coromant DDNNN 2525M 1504.

Для проведения экспериментов был разработан автоматизированный многопараметрический стенд (рисунок 1), созданный на базе токарно-винторезного станка Knuth Turnado 230/1000 V.

В состав разработанного стенда включены следующие технологические компоненты: 1 – система измерения температурной деформации резца; 2 –

резец; 3 - динамометр; 4 – деталь; 5 – измерение шероховатости поверхности; 6 – система измерения диаметра детали; 7 – тепловизор; 8 – измерение положения вершины резца; 9 – измерение положения державки резца; 10 – муфельная печь; 11 – твердомер; 12 – блок сбора и обработки информации; 13 – блок вторичной обработки информации; 14 – монитор.

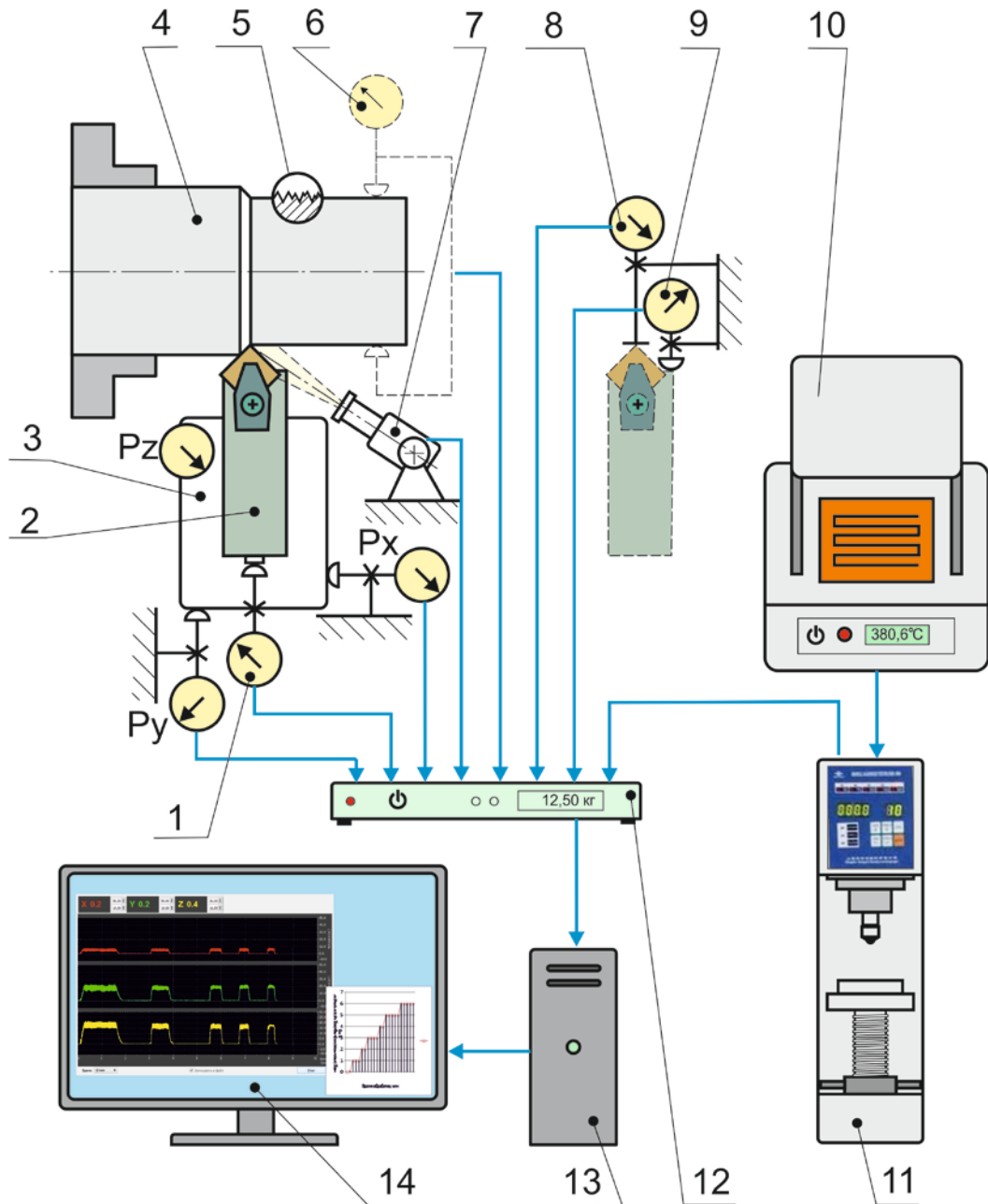


Рисунок 1 – Компонентная схема автоматизированного многопараметрического стенда для экспериментальных исследований

Система измерения размерного износа резца (рисунок 2) позволяет непосредственно на станке измерять размерный износ, без предварительной термостабилизации державки резца. Измерение положения державки резца и положения его вершины расположены практически в одной плоскости, что дает возможность исключить влияние температурной деформации резца.

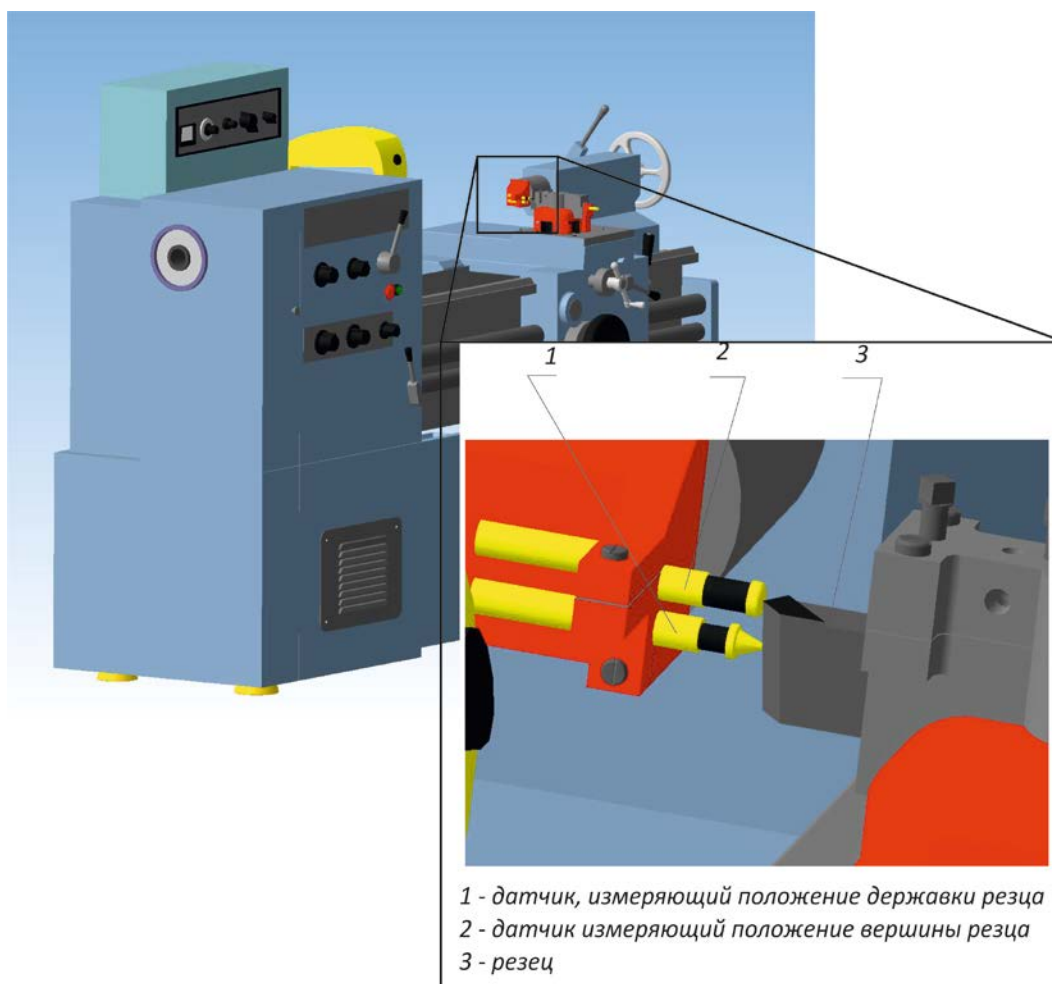


Рисунок 2 – Система измерения размерного износа резца

Измерение размерного износа резца производится с помощью двух индуктивных датчиков (1 – датчик М-022-02, измеряющий положение державки резца; 2 – датчик М-022-02, измеряющий положение вершины резца), установленных в задней бабке станка и блока БИН-2И. Размерный износ режущей пластины измеряется как разность показаний датчиков 1 и 2.

Для определения погрешности измерения размерного износа режущего инструмента были проведены испытания системы измерения размерного износа.

Перед началом экспериментальных исследований по измерению размерного износа резца была проведена проверка точности показаний индуктивной измерительной системы. Для определения погрешности измерения размерного износа режущего инструмента был многократно (100 раз) измерен размерный износ одного резца с одним значением износа.

Погрешность, вызванная ошибками настройки инструмента на размер, определяется для каждой для каждой единицы оборудования индивидуально. Обычно инструмент подается многократно (50 – 100 раз) в различные точки зоны обработки и определяется погрешность его позиционирования по отношению к номинальному положению, далее рассчитывается среднее значение \bar{x} и среднеквадратическое отклонение σ по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n). \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2)$$

где:

n - количество измерений; x_i - величина единичного измерения.

Максимальная величина погрешности вызванной ошибками настройки инструмента на размер $\Delta_{\text{инст.}}$ определится по формуле:

$$\Delta_{\text{инст.}} = \pm 3\sigma. \quad (3)$$

По формулам (1 – 3) была вычислена погрешность измерительной системы ($\pm 3\sigma$), равная $\pm 0,35$ мкм.

В третьей главе проведены эксперименты при точении титанового сплава ВТ8.

1) однофакторные - для определения характера зависимостей параметров оптимизации от факторов. По экспериментальным данным построена зависимость размерного износа резца U от пути резания L при различных скоростях резания (рисунок 3), разных радиусах при вершине (рисунок 4) и разных подачах (рисунок 5).

2) многофакторные - по результатам которых можно провести регрессионный анализ, для определения коэффициентов уравнения математической модели относительного износа режущего инструмента.

Для численной оценки относительного размерного износа резца U_0 при точении новых труднообрабатываемых сплавов рекомендуется пользоваться эмпирической формулой. По которой зависимость относительного размерного износа резца от режимов резания при работе конкретным инструментом будет выражаться формулой:

$$U_0 = C_u \cdot V^{a_u} \cdot S^{b_u} \cdot R^{d_u}. \quad (4)$$

где:

V – скорость резания, м/мин;

S – подача, мм/об;

R – радиус при вершине режущей кромки;

C_u – коэффициент, зависящий от геометрии и материала инструмента;

a_u , b_u и d_u – показатели степени V , S и R соответственно.

Для определения коэффициентов C_u , a_u , b_u и d_u необходимо провести полнофакторный эксперимент в диапазоне рекомендованных режимов резания.

Относительный износ U_0 – это характеристика размерного износа. Он равен углу наклона аппроксимирующей прямой, к оси абсцисс.

В таблице 1 сведены все полученные параметры оптимизации для каждого многофакторного эксперимента.

На основании многофакторных экспериментов с помощью программы СТАТИСТИКА найдены коэффициенты линейного уравнения регрессии

$$\ln(U_0) = 2,42 + 0,11 \cdot \ln(V) + 0,7 \cdot \ln(s) + 0,34 \cdot \ln(R) \quad (5)$$

Линейное уравнение (5) преобразовали в степенное и оно получило вид:

$$U_0 = 11,3 \cdot V^{0,11} \cdot s^{0,7} \cdot R^{0,34} \text{ мкм/км} \quad (6)$$

Относительный износ режущего инструмента напрямую связан со стойкостью. Чем ниже относительный износ, тем выше стойкость инструмента.

Таблица 1 – Параметры оптимизации для каждого эксперимента

№	V, м/мин	s, мм/об	R, мм	U _о , мкм/км
1	40	0,041	0,1	0,8053
2	40	0,041	0,4	1,0861
3	40	0,082	0,1	1,2055
4	40	0,082	0,4	2,8557
5	80	0,041	0,1	0,7903
6	80	0,041	0,4	1,9198
7	80	0,082	0,1	1,7566
8	80	0,082	0,4	1,5273

По результатам экспериментов были построены графики, по которым можно сделать следующие выводы:

– С увеличением скорости резания с 40 м/мин до 80 м/мин относительный износ увеличивается с 1,84 мкм/км до 3,15 мкм/км.

– Радиус при вершине не сильно влияет на относительный износ: при радиусе 0,1 мм относительный износ составил 1,05 мкм/км, а при R = 0,4 относительный износ 0,65 мкм/км.

– С увеличением подачи от 0,041 мм/об до 0,212 мм/об относительный износ увеличивается от 1,17 мкм/км до 6 мкм/км.

Таким образом для максимальной стойкости режущего инструмента необходимо вести обработку титанового сплава ВТ8 со следующими режимами:

V = 40 м/мин; (производители режущих инструментов не рекомендуют вести обработку титановых сплавов на скоростях ниже 40 м/мин, т.к. при обработке на малых скоростях возникает высокое трение, что приводит к большому выделению тепла и повышенному износу режущего инструмента).

R = max; (использовать максимальный радиус режущей пластинки, возможно точение круглыми пластинками).

S = 0,041 мм/об. (при меньшей подачи инструмент перестает резать – начинает давить металл).

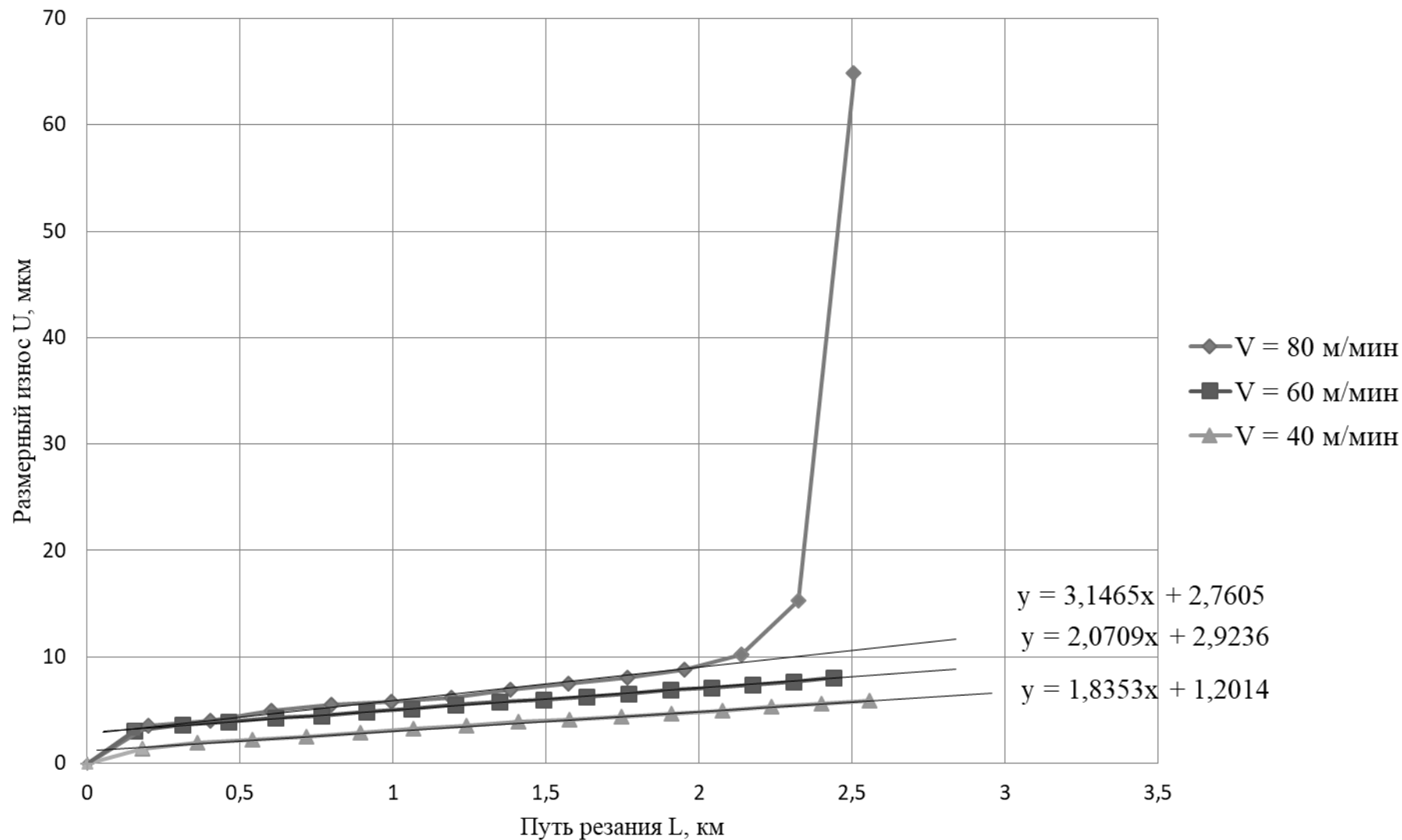


Рисунок 3 – Зависимость размерного износа резца от пути резания при разных скоростях резания: $s = 0,136$ мм/об, $R = 0,4$ мм, $t = 0,5$ мм.

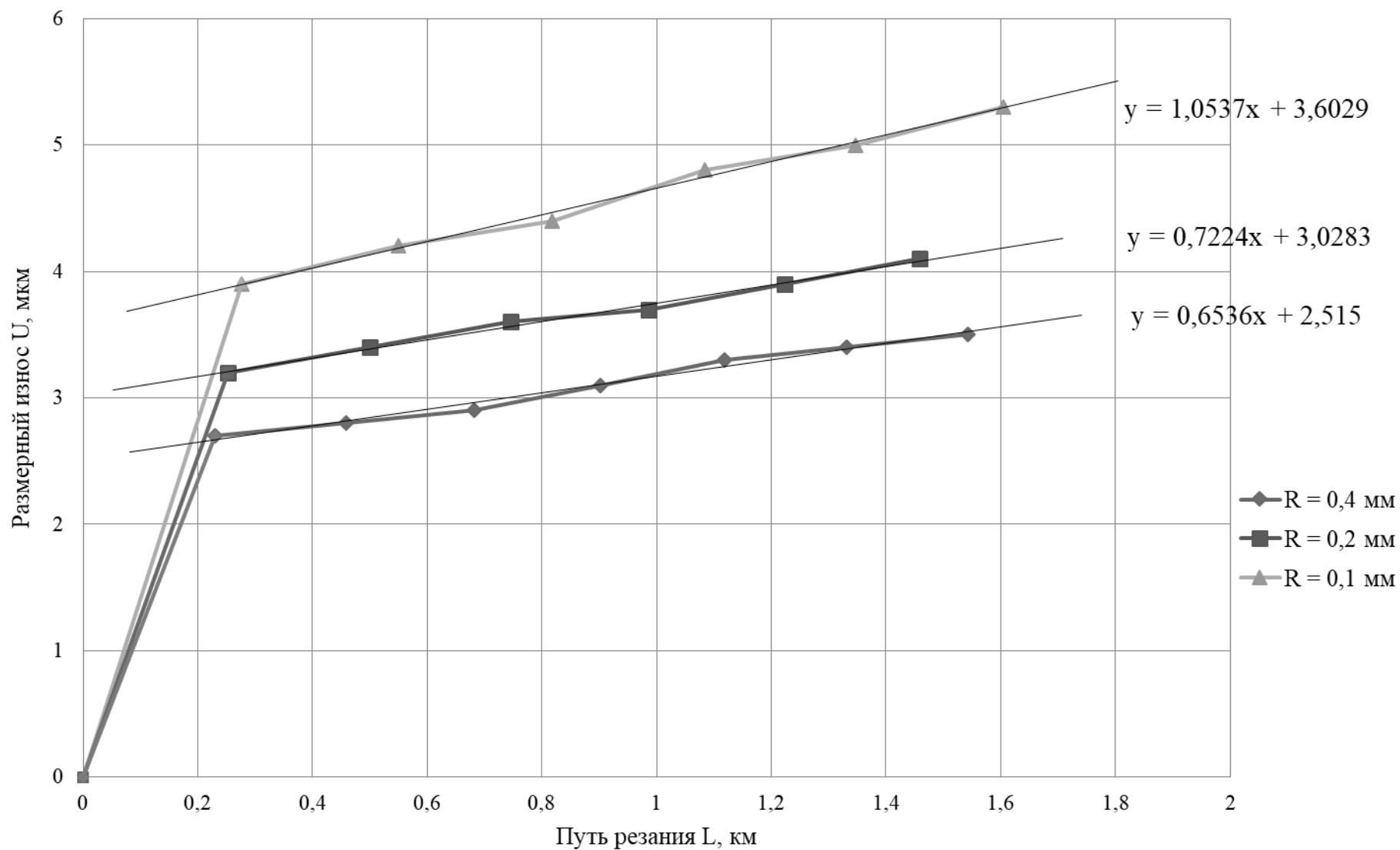


Рисунок 4 – Зависимость размерного износа реза от пути резания при разных радиусах при вершине реза: $s = 0,062 \text{ мм/об}$, $V = 60 \text{ м/мин}$, $t = 0,5 \text{ мм}$.

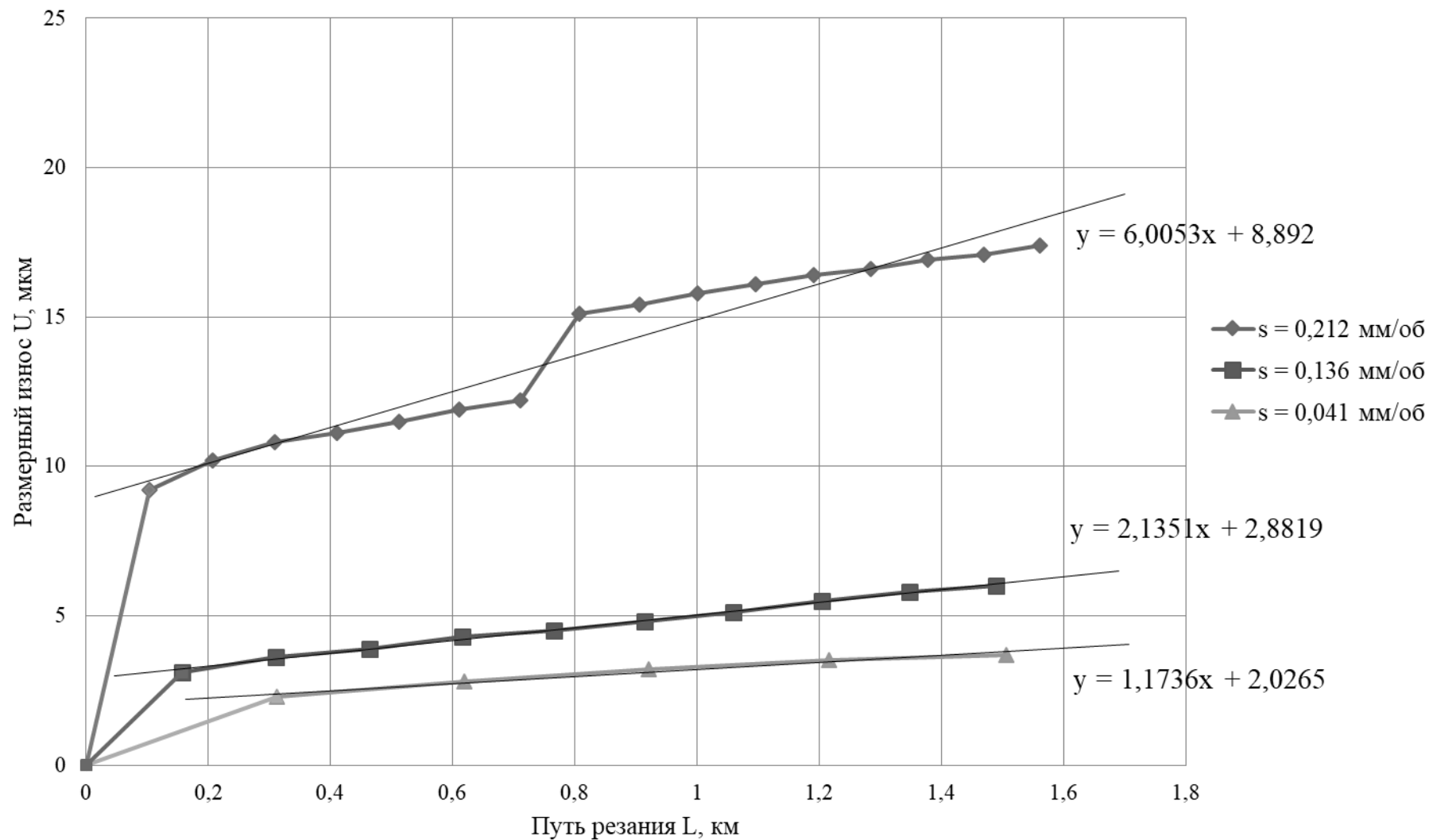


Рисунок 5 – Зависимость размерного износа резца от пути резания при разных подачах:
 $R = 0,4$ мм, $V = 60$ м/мин, $t = 0,5$ мм.

В четвертой главе проведены эксперименты по точению титанового сплава ВТ41. По аналогии с экспериментами титанового сплава ВТ8 проведены однофакторные и многофакторные эксперименты.

По экспериментальным данным однофакторного эксперимента построены зависимости относительного износа U_0 от скорости резания V , подачи s и радиуса при вершине резца R (рисунок 6 – 8).

Последовательность многофакторного эксперимента и выбранные диапазоны варьирования скорости резания, радиуса при вершине и подачи приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Порядок проведения экспериментов и выбранные факторы

№	V , м/мин	s , мм/об	R , мм
1	40	0,041	0,1
2	40	0,041	0,4
3	40	0,098	0,1
4	40	0,098	0,4
5	80	0,041	0,1
6	80	0,041	0,4
7	80	0,098	0,1
8	80	0,098	0,4

По аналогии с ВТ8 найдены коэффициенты уравнения регрессии, преобразовали его в степенное и оно получило вид:

$$U_0 = 0,001 \cdot V^{4,02} \cdot s^{3,35} \cdot R^{-0,96} \quad \text{мм/мм} \quad (7)$$

Для подтверждения правильности проведенных экспериментов, в полученное уравнение регрессии были подставлены факторы из однофакторного эксперимента и построены зависимости параметров оптимизации, рассчитанные в результате уравнений регрессии, от факторов. Были получены сравнительные зависимости относительного износа U от скорости резания V (рисунок 6), подачи s (рисунок 7) и радиуса при вершине резца R (рисунок 8).

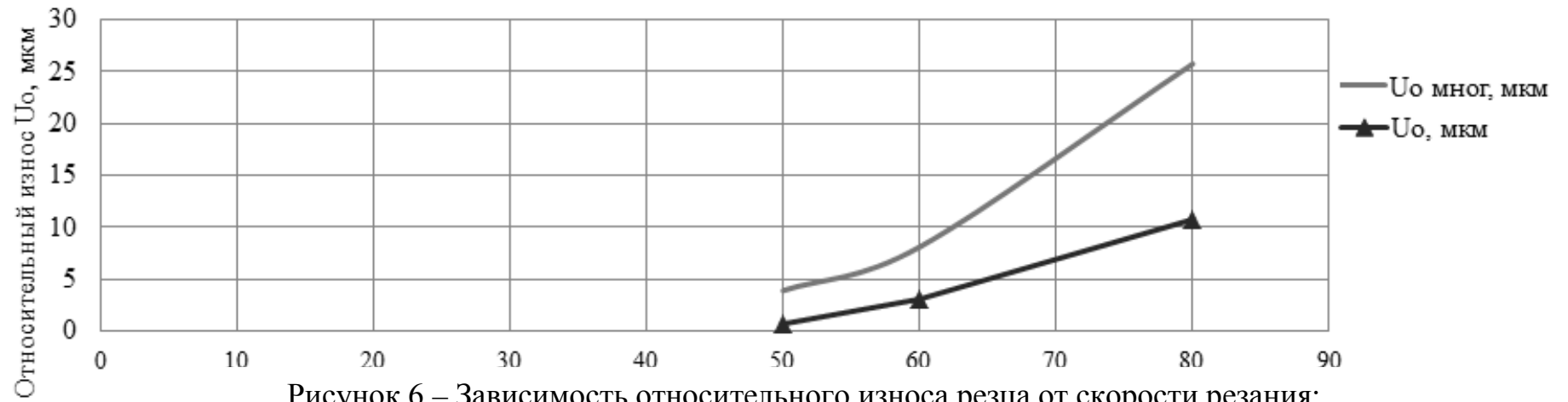


Рисунок 6 – Зависимость относительного износа резца от скорости резания:
 $s = 0,068$ мм/об, $R = 0,2$ мм, $t=0,5$ мм.

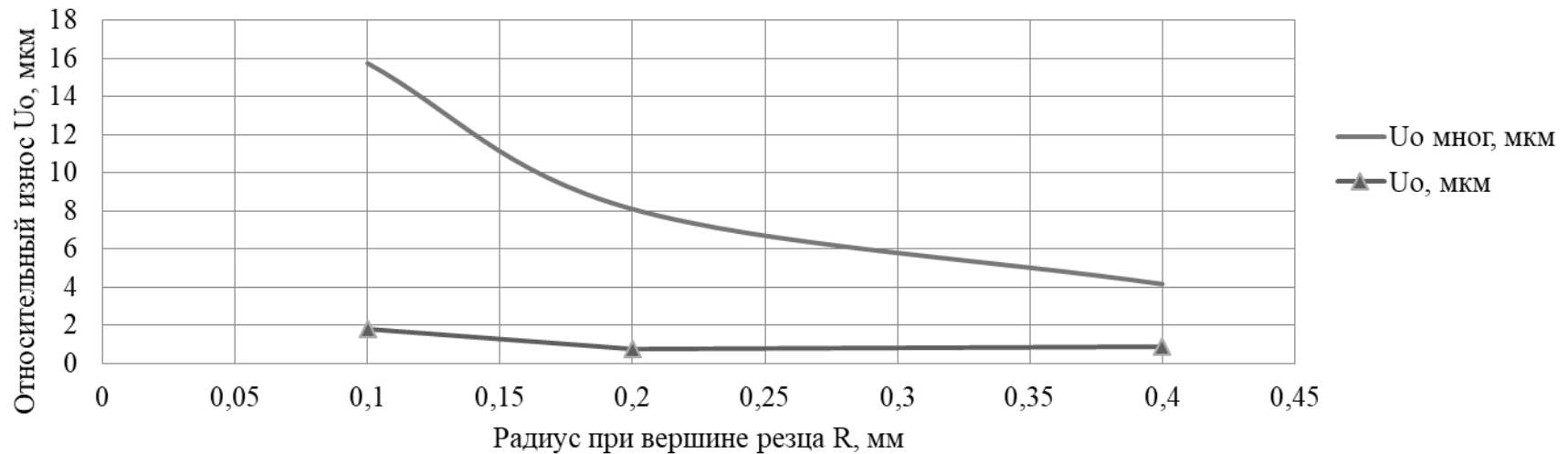


Рисунок 7 – Зависимость относительного износа резца от радиуса при вершине:
 $s = 0,068$ мм/об, $V = 60$ м/мин, $t=0,5$ мм.

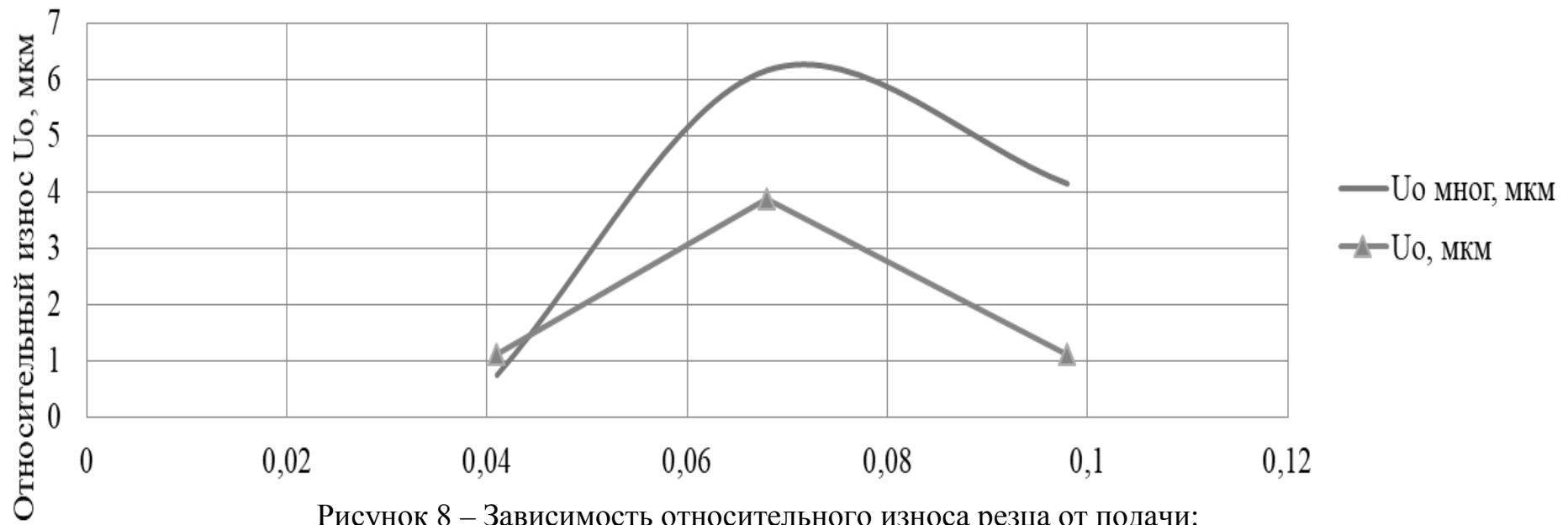


Рисунок 8 – Зависимость относительного износа резца от подачи:
 $R = 0,4 \text{ мм}$, $V = 60 \text{ м/мин}$, $t=0,5\text{мм}$.

По результатам экспериментов по точению титанового сплава ВТ41 были построены графики, по которым можно сделать следующие выводы:

Относительный износ больше всего зависит от скорости резания: в интервале скоростей от 50 м/мин до 80 м/мин износ вырос на 10 мкм на 1 км. В меньшей степени относительный износ зависит от подачи (в диапазоне от 0,041 мм/об до 0,098 мм/об износ вырос на 0,15 мкм на 1 км) и от радиуса при вершине резца (в диапазоне от 0,1 мм до 0,4 мм износ вырос на 0,9 мкм на 1 км);

Таким образом для максимальной стойкости режущего инструмента необходимо вести обработку титанового сплава ВТ41 со следующими режимами:

$V = 40$ м/мин; (производители режущих инструментов не рекомендуют вести обработку титановых сплавов на скоростях ниже 40 м/мин, т.к. при обработке на малых скоростях возникает высокое трение, что приводит к большому выделению тепла и повышенному износу режущего инструмента).

$R = \max$; (использовать максимальный радиус режущей пластинки, возможно точение круглыми пластинками).

$S = 0,098$ мм/об. (при такой подаче относительный износ увеличится несильно, а производительность вырастет почти в два раза).

Выводы:

В работе проводились эксперименты для создания математической модели, которая позволяет определить оптимальные режимы резания по повышению стойкости режущего инструмента при точении принципиально нового титанового сплава ВТ41. Данными результатами работы рекомендуется пользоваться на металлообрабатывающих предприятиях, занимающихся обработкой титанового сплава ВТ41 для снижения себестоимости деталей за счет экономии на режущем инструменте, т.к. основные затраты производства идут на закупку дорогостоящего инструмента.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

1. «Установка для исследования процесса резания при точении титановых сплавов» (Неделя науки СПбГПУ материалы научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: М.С. Кокорин (ответственный редактор) и др.. 2014. С. 245-247);
2. «Автоматизированный многопараметрический стенд для исследования процесса резания при точении жаропрочных титановых сплавов» (Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. 2015. С. 290-292);
3. «Повышение стойкости режущего инструмента при точении жаропрочных титановых сплавов» (Неделя науки СПбПУ Материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. М.С. Кокорин (отв. ред.). 2015. С. 226-228);
4. «Многопараметрический автоматизированный стенд для исследования обрабатываемости труднообрабатываемых сплавов» (Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5. С. 954-970.