

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). С. 24-30.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №1 (139). P. 24-30.

Научная статья  
УДК 621.993  
doi:10.30987/2223-4608-2023-1-24-30

## Измерение силы резания и крутящего момента при резьбофрезеровании

Сергей Алексеевич Сайкин<sup>1</sup>, К.Т.Н.,  
Егор Викторович Цветков<sup>2</sup>, К.Т.Н.,  
Александр Викторович Толкачев<sup>3</sup>, К.Т.Н.  
<sup>1,2,3</sup> ПАО «Объединенная Двигателестроительная Корпорация - Сатурн», г. Рыбинск, Россия  
<sup>1</sup> saikinsergey@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>  
<sup>2</sup> egordis@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>  
<sup>3</sup> ditolk14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** В статье представлены результаты испытаний в лабораторных условиях влияния скорости и глубины резания на силу резания.

**Ключевые слова:** резьбофрезерование, внутренняя резьба, составляющие силы резания, крутящий момент, жаропрочный сплав

**Для цитирования:** Сайкин С.А., Цветков Е.В., Толкачев А.В. Измерение силы резания и крутящего момента при резьбофрезеровании // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – №1 (139). – С. 24-30. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-24-30.

Original article

## Measurement of cutting force and torque during thread milling

Sergey A. Saikin<sup>1</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Egor V. Tsvetkov<sup>2</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Aleksandr V. Tolkachev<sup>3</sup>, Can.Sc.Tech.  
<sup>1,2,3</sup> Public joint-stock company «United Engine Corporation - Saturn», Rybinsk, Russia  
<sup>1</sup> saikinsergey@yandex.ru, <sup>2</sup> egordis@rambler.ru, <sup>3</sup> ditolk14@gmail.com

**Abstract.** The results of laboratory tests of the effect of cutting speed and depth on the cutting force are presented.

**Keywords:** threading, internal thread, components of the cutting force, torque, heat-resistant alloy

**For citation:** Saikin S.A., Tsvetkov E.V., Tolkachev A.V. Measurement of cutting force and torque during thread milling. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2023, no. 1 (139), pp. 24-30. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30.

Резьбофрезерование нельзя отнести к новым методам обработки. В 1962 г. ГОСТ 1336 трактовал основные положения данного метода и применяемый инструмент. Процесс фрезерования исследовался различными учеными. Практически все работы посвящены точности

обработки и профилированию инструмента. Вопросам определения сил резания и деформации инструмента уделено мало внимания. В связи с этим особый интерес представляют работы бразильских исследователей Анна Карла Араужо, Хосе Луис Сильвейра, С. Капур,

Мартин Б.Г. Джун, Шив Г. Капур и Ричард ДеВор. В статьях, опубликованных ими авторами [1,2,3], представлены зависимости для определения составляющих силы резания и построены графики изменения составляющих силы резания при вращении фрезы.

Знания о составляющих силы резания позволяют перейти к расчету величины деформации инструмента, напрямую влияющей на точность обработки, работоспособность и стойкость инструмента. Поскольку в открытых источниках авторам не удалось найти данные результатов реального эксперимента с измерением оставляющих силы резания, было решено выполнить экспериментальные работы на ПАО «ОДК-Сатурн».

Фрезерование резьбы выполнялось на станке с ЧПУ мод. 400V/4 (ОАО «Стерлитамак МТЕ»). Используемое СОТС – Mobil 251 (подвод наружный). Торцевое и радиальное биение фрез не превышало 5 мкм. Для замера использовали индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм. Измерение составляющих силы резания выполнялось динамометром УДМ 600 с тензоусилителем ТА-5, блоком фильтров и делителей К121 и осциллографом Н117. Фиксировались: осевая, радиальная составляющие силы резания и крутящий момент. Образец призматический (45×150×95 мм) из сплава на никелевой основе ЖС6У-ВИ. Отверстия под резьбу диаметром 5 мм, глубиной 9 мм. Резьба М6-Н5Н6 правая глубиной 8 мм. Фрезерование

встречное. Программа управления для станка написана техническим специалистом фирмы Guhring. Износ фрез определялись с помощью инструментальной лупы Бринелля, с ценой деления 0,05 мм, и микроскопа «Альтами МЕТ 2».

*Первый эксперимент* заключался в измерении составляющих силы резания и крутящего момента при скоростях резания 20 и 30 м/мин.

Использовались резьбофрезы 3525 6,000 TiCN (фирмы Guhring) на двух режимах обработки. Первый: скорость резания 30 м/мин; число оборотов фрезы 2125 об/мин; подача на зуб фрезы 0,02 мм/зуб; минутная подача 128 мм/мин. Второй: скорость резания 20 м/мин; число оборотов фрезы 1370 об/мин; подача на зуб фрезы 0,02 мм/зуб; минутная подача 82 мм/мин. Число проходов ( $N$ ) и глубина резания ( $t_i$ ) для обоих режимов одинаковые: №1 – 0,2 мм; №2 – 0,1 мм; №3 – 0,1 мм; №4 – 0,05 мм; №6 и №7 – 0 мм (калибрующие проходы). Полных планетарных оборотов для формирования резьбы – 1. На каждом режиме испытывалось по четыре новых фрезы. Обработывалось по три резьбы. Длиннокромочные фрезы выбраны с целью наблюдения за влиянием деформации инструмента. Замеренные значения составляющих силы резания для первого планетарного оборота гребенчатой резьбофрезы представлены в табл. 1. По средним значениям построены графики (рис. 1, 2, 3).

### 1. Результаты 1-го эксперимента

При скорости 30 м/мин					При скорости 20 м/мин			
№N	фреза №1	фреза №2	фреза №3	фреза №4	фреза №5	фреза №6	фреза №7	фреза №8
Крутящий момент резания, Н·м								
1-е отверстие								
1	0,152	0,158	0,161	0,149	0,192	0,198	0,198	0,183
2	0,193	0,204	0,209	0,197	0,209	0,214	0,214	0,202
3	0,237	0,251	0,232	0,246	0,248	0,263	0,243	0,258
4	0,211	0,210	0,212	0,200	0,225	0,212	0,212	0,210
5	0,257	0,254	0,253	0,258	0,241	0,226	0,222	0,226
6	0,135	0,126	0,132	0,129	0,161	0,172	0,168	0,164
7	0,111	0,104	0,107	0,109	0,124	0,116	0,112	0,114
2-е отверстие								
1	0,183	0,192	0,181	0,178	0,253	0,266	0,251	0,246
2	0,250	0,264	0,241	0,261	0,270	0,277	0,253	0,274
3	0,310	0,322	0,293	0,316	0,309	0,328	0,298	0,321
4	0,261	0,258	0,260	0,243	0,285	0,281	0,280	0,262
5	0,290	0,272	0,289	0,272	0,291	0,273	0,272	0,267
6	0,174	0,187	0,174	0,179	0,197	0,184	0,182	0,191
7	0,138	0,129	0,138	0,127	0,176	0,164	0,164	0,174

**Технологии механической обработки заготовок  
Technologies of mechanical processing of workpieces**

При скорости 30 м/мин					При скорости 20 м/мин			
№N	фреза №1	фреза №2	фреза №3	фреза №4	фреза №5	фреза №6	фреза №7	фреза №8
3-е отверстие								
1	0,196	0,184	0,184	0,178	0,260	0,259	0,251	0,247
2	0,255	0,269	0,246	0,266	0,275	0,283	0,258	0,279
3	0,304	0,319	0,308	0,312	0,304	0,324	0,294	0,317
4	0,274	0,273	0,274	0,257	0,300	0,298	0,295	0,277
5	0,299	0,288	0,302	0,286	0,303	0,288	0,285	0,280
6	0,177	0,183	0,174	0,177	0,198	0,181	0,181	0,190
7	0,137	0,135	0,130	0,126	0,168	0,168	0,152	0,162
Радиальная составляющая силы резания, Н								
1-е отверстие								
1	105,1	99,8	106,9	103,8	112,7	114,1	120,3	110,8
2	129,6	127,6	139,7	133,4	126,6	121,3	128,6	125,8
3	175,5	176,6	189,3	181,2	170,5	159,7	164,0	162,9
4	171,0	166,2	183,0	174,9	161,0	155,1	158,4	152,7
5	170,0	178,2	187,4	178,2	159,1	160,5	167,2	152,6
6	103,5	108,4	113,9	108,4	99,0	103,9	101,3	98,9
7	76,2	74,4	78,2	79,3	71,0	74,4	75,7	74,4
2-е отверстие								
1	121,9	121,6	127,1	123,5	145,6	132,7	146,6	139,2
2	169,0	177,2	185,0	177,1	179,0	176,2	187,9	178,6
3	228,4	238,6	252,1	239,7	220,9	221,1	223,7	210,2
4	213,0	224,4	227,9	221,8	203,0	192,6	200,2	187,4
5	209,3	230,3	224,5	221,4	192,1	200,1	207,5	192,3
6	132,9	141,9	138,4	137,7	140,4	139,7	147,4	135,6
7	97,0	103,3	99,3	99,9	83,9	86,7	87,5	83,8
3-е отверстие								
1	130,4	118,7	129,0	122,0	149,8	149,2	146,8	139,9
2	172,4	180,7	188,7	180,6	182,6	179,7	191,7	182,0
3	233,8	236,2	248,3	236,7	217,3	218,6	220,6	207,3
4	223,7	237,9	240,4	234,5	213,9	203,9	211,5	197,9
5	225,6	244,1	234,6	233,0	200,0	211,4	217,6	201,5
6	135,6	139,1	138,4	136,4	141,1	137,6	146,7	135,1
7	96,0	91,9	93,3	91,4	79,9	78,2	81,2	78,0
Осевая составляющая силы резания, Н								
1-е отверстие								
1	88,5	88,2	93,5	90,1	190,9	180,2	199,3	183,6
2	120,4	116,7	110,2	115,8	205,0	205,5	220,0	207,6
3	216,8	210,9	234,3	220,7	245,0	246,8	265,5	242,4
4	196,0	195,5	207,4	199,6	209,0	203,5	218,9	205,9
5	188,2	192,6	206,1	195,6	197,4	194,4	215,9	194,5
6	137,8	139,1	151,3	142,7	135,3	139,8	148,1	141,9
7	108,7	100,7	110,0	106,5	98,7	106,9	108,8	103,5
2-е отверстие								
1	304,4	304,7	325,1	311,4	333,1	326,5	355,9	321,6
2	366,9	373,8	404,8	381,8	370,5	347,6	350,3	338,3
3	421,9	418,6	456,6	432,4	405,2	412,9	420,5	392,2
4	371,3	365,3	405,5	380,7	339,1	354,9	370,7	337,2
5	326,7	329,1	357,9	337,9	301,4	315,9	330,4	300,1
6	236,3	235,0	260,6	244,0	214,9	226,1	237,2	214,7
7	167,2	168,4	185,0	173,5	153,4	161,7	170,0	153,6
3-е отверстие								
1	325,7	302,5	330,0	307,5	342,7	327,9	356,3	323,2
2	374,2	381,3	412,9	389,5	377,9	354,6	357,3	345,1
3	413,5	414,4	449,8	427,0	398,6	408,2	414,7	386,7
4	389,9	387,2	427,8	402,6	357,3	375,8	391,6	356,0
5	346,5	348,8	374,0	355,6	313,8	333,7	346,5	314,4
6	241,0	240,3	260,6	241,5	216,0	222,7	236,0	214,0
7	165,5	159,9	173,9	158,8	146,1	145,9	157,7	143,0

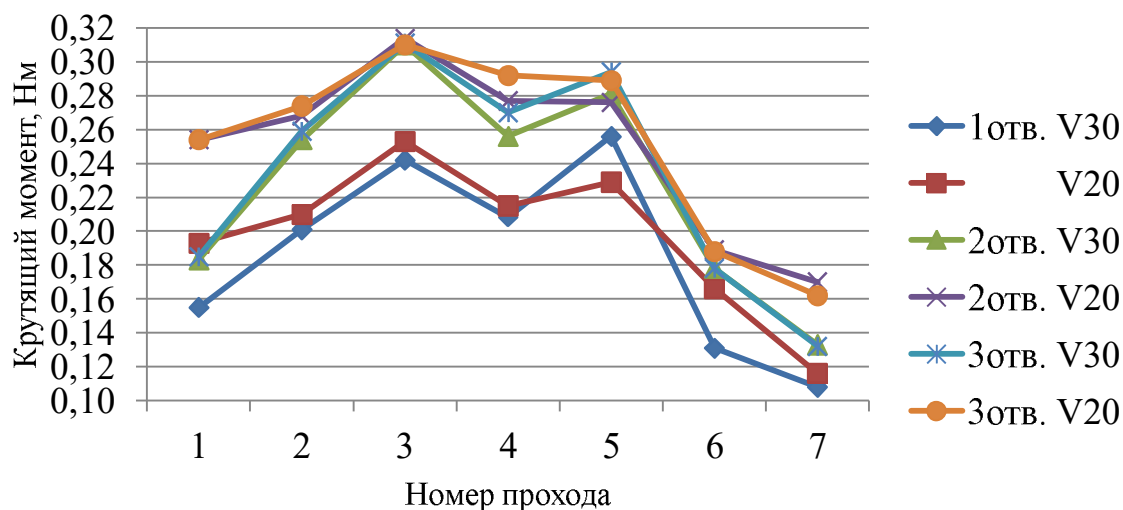


Рис. 1. График крутящего момента

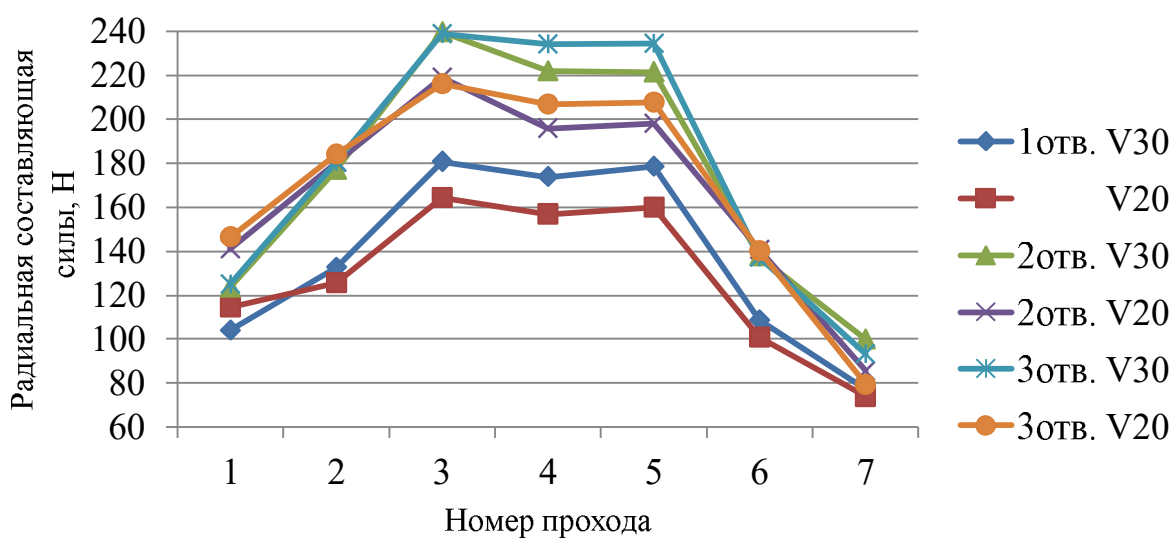


Рис. 2. График радиальной составляющей силы резания

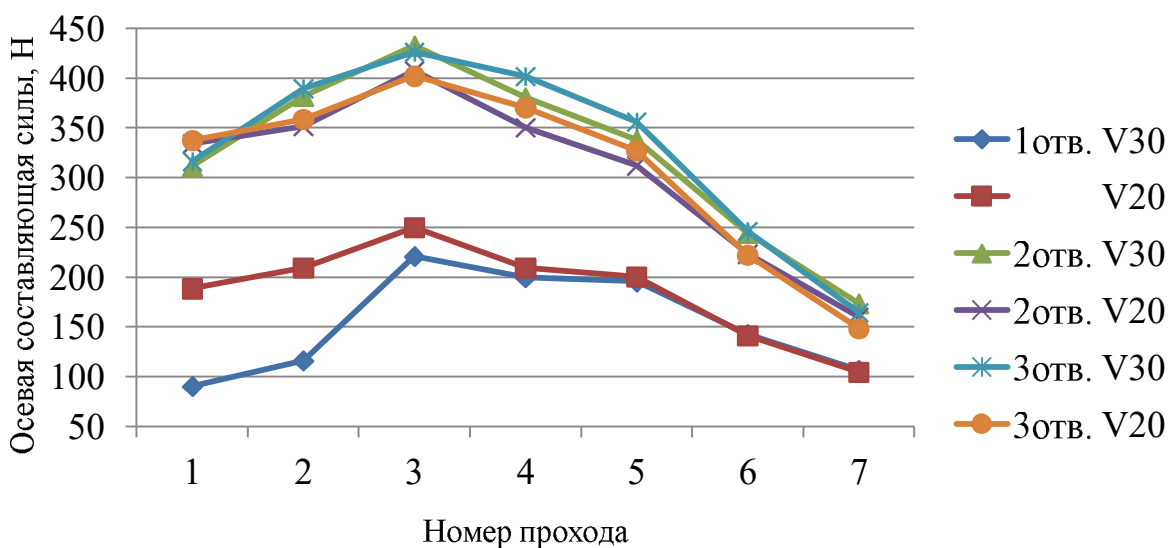


Рис. 3. График осевой составляющей силы резания

Износ фрез по задней поверхности зубьев при скорости резания 30 м/мин после обработки первой резьбы составил 0,1 мм, после второй – 0,35 мм. Износ при скорости резания 20 м/мин составил 0,2 мм и 0,4 мм, соответственно.

Площадки износа инструмента наблюдаются на всех трех задних поверхностях режущего зуба. Но наибольший износ имеют боковые поверхности, обращенные в направлении осевой подачи и при вершинах зубьев. Износ боковых сторон, обращенных против осевого движения инструмента в 3 – 4 раза меньше. Износ зубьев так же не равномерен и возрастает в направлении хвостовика. Менее изношенные зубья 1 ряда, а зубья в 7 и 6 ряду имеют наибольший износ. Это объясняется различной фактической глубиной резания ввиду деформации инструмента.

Проверка на соответствие обработанной поверхности резьбе М6-Н5Н6 выполнялась двумя аттестованными калибрами (проходным и непроходным). После пятого прохода проходной калибр ввинчивался на глубину не более 1,0...1,5 мм, после шестого – на глубину 1,5...2,0 мм, после седьмого – ввернулся на всю глубину резьбы (8 мм). На протяжении всего эксперимента непроходной калибр не ввинчивался ни в одну из резьб. Выполненные замеры свидетельствуют о соответствии обработанных поверхностей резьбе М6-Н5Н6.

По результатам первого эксперимента сформулированы следующие выводы.

1. Деформация инструмента оказывает значительное влияние на процесс резания. Задаваемая в управляющую программу глубина резания для 6 и 7 прохода, равнялась нулю. При этом наблюдался процесс резания. Фреза срезала объем материала, который не удалось удалить на предыдущем проходе.

2. На процесс резания значительное влияние оказывает износ инструмента. Что проявляется в значительном увеличении силы резания при обработке второй и третьей резьбы в сравнении с первым. Наибольшее влияние оказывает износ задней боковой поверхности зуба на осевую составляющую от 1 к 3 проходу. Не зависимо от скорости резания, для первой резьбы разница значений составляющих силы резания между 1 и 2 проходами меньше, разницы между 2 и 3. При обработке второй резьбы – наоборот.

3. Графики радиальных составляющих силы резания в ряде случаев имеют пересечение, что можно объяснить переходными процессами от резания к подмятию металла без удаления

стружки в условиях малых глубин резания, а также нестационарное значение деформации инструмента.

4. На направление вектора и значение составляющей силы резания влияет не только угол подъема резьбы, но и геометрия резьбового профиля, что доказывает необходимость учета его геометрических характеристик при аналитическом определении силы резания. Когда угол наклона боковой стороны зуба, обращенной в направлении подачи, меньше  $45^\circ$  (у метрической резьбы –  $30^\circ$ ) при равной глубине резания, скорость возрастания осевой составляющей превосходит скорость возрастания радиальной.

5. На значение силы резания оказывает влияние не только заданная глубина резания, но и глубина прорезанной на предыдущем проходе резьбовой поверхности, поскольку она влияет на площадь сечения среза. Данный факт наблюдается на проходах 2 и 3, 4 и 5, где глубина резания одинаковая.

6. Группа резьбовых фрез 3525 6,000 TiCN, работавшая со скоростью 30 м/мин имеет меньший износ в сравнении с группой фрез, скорость резания которых составляла 20 м/мин, что свидетельствует о более благоприятных условиях обработки. Данное явление может быть объяснено несколькими закономерностями, одними из которых являются термомеханические и динамические характеристики процесса и системы СПИЗ в целом.

**Второй эксперимент:** измерение составляющих силы резания и крутящего момента при различной глубине резания.

В качестве инструмента на данном этапе экспериментальной работы использовались три гребенчатые резьбовые фрезы MTECS06047C141.0ISO IC908 (Iscar). Данные фрезы имеют три ряда зубьев, глубину резания можно варьировать в широком диапазоне значений. Режимы резания назначены специалистом инструментальной фирмы Iscar для обработки резьбы М6-Н5Н6 данным инструментом в деталях из сплавов на никелевой основе. Каждая из фрез нарезала в пяти отверстиях за один проход резьбовые поверхности с заданными глубинами резания от 0,1 мм до 0,5 мм с шагом 0,1 мм. Режимы резания: скорость резания 20 м/мин; число оборотов фрезы 1370 об/мин; подача на зуб фрезы 0,02 мм/зуб; минутная подача 82 мм/мин; 6 полных планетарных оборотов для формирования резьбы.

Износ после нарезания резьбы в пятом отверстии не превышал 0,1 мм по задней поверхности зубьев, расположенных в ближнем к хво-

стовику ряду. В остальных рядах износ составлял не более 0,03 мм. Данный факт объясняется тем, что резьбофреза формирует резьбовую поверхность за 6 полных планетарных оборотов, условно «вывинчиваясь» из отверстия. При этом лишь на первом обороте зубья работают в равных условиях, наблюдаются наибольшие значения силы резания. Формообразование осуществлялось рядом зубьев, расположенных ближе к хвостовику, а остальные выполняли функцию калибрующих. Значения замеренных

составляющих силы резания на втором и последующих планетарных оборотах фрезы снижалось в 2 – 3 раза в сравнении с первым. Это обусловлено тем, что при фрезеровании первого витка отсутствуют резьбовые канавки, сформированные на предыдущих проходах, и в резании участвуют все три ряда зубьев. Замеренные значения составляющих силы резания для первого планетарного оборота резьбофрезы представлены в табл. 2. По средним значениям построен график (рис. 4).

## 2. Результаты 2-го эксперимента

Глубина резания, мм	Условный номер фрезы								
	№1	№2	№3	№1	№2	№3	№1	№2	№3
	Крутящий момент резания, Н·м			Радиальная составляющая силы резания, Н			Осевая составляющая силы резания, Н		
0,1	0,111	0,1140	0,117	61,8	65,3	66,5	50,7	82,4	88,5
0,2	0,142	0,1460	0,150	84,5	92,0	99,5	137,0	142,0	167,4
0,3	0,161	0,1650	0,169	137,0	146,2	153,5	149,9	200,4	212,9
0,4	0,219	0,2235	0,228	158,3	172,1	203,5	293,9	301,0	336,1
0,5	0,272	0,2770	0,282	220,2	223,2	246,2	396,4	428,4	449,5

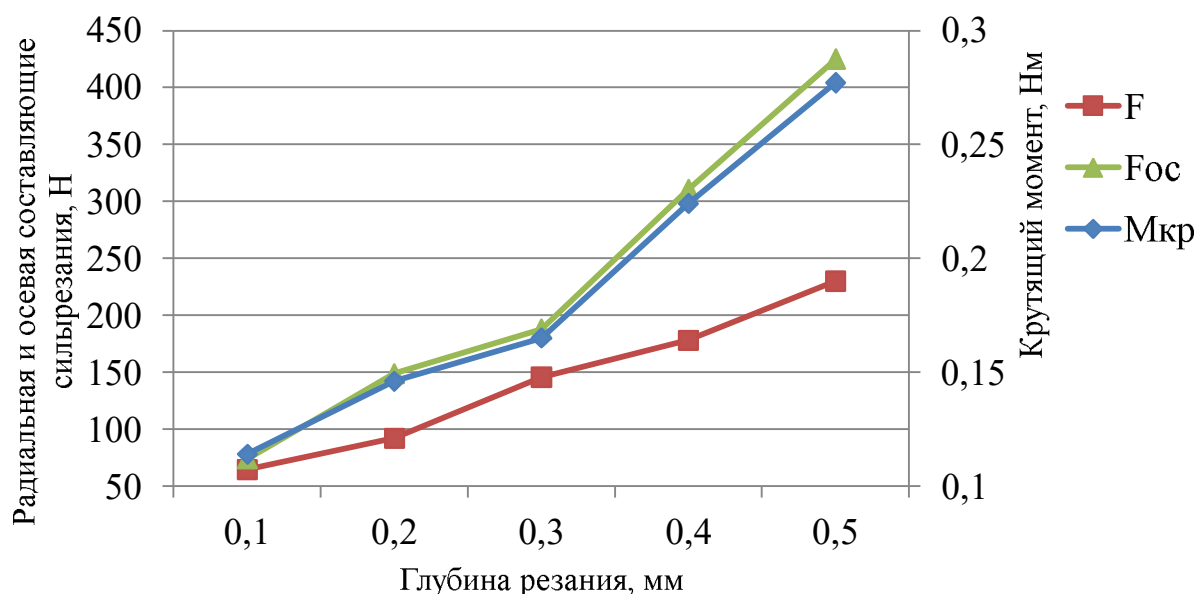


Рис. 4. График составляющих силы резания и крутящего момента

По результатам проведенного эксперимента сформулированы выводы:

1. Представленные графики указывают на зависимость схожую с линейным законом изменения. Отклонения связаны с износом, деформацией фрезы и особенностями процесса формирования тонких стружек.

2. Из графика видно, что изменение

осевой составляющей силы резания пропорционально изменению крутящего момента. И обратно пропорционален изменению радиальной составляющей. Данный факт объясняется тем, что чем больше радиальное воздействие на инструмент, тем больше его деформация и меньше сечение среза, что уменьшает осевую нагрузку и крутящий момент.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. **A model** for thread milling cutting forces / A.C. Araujo, J.L. Silveira, B.G. Martin Jun, S.G. Kapoor, R. DeVor // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – vol. 46 – Issue 15. – P. 2057-2065.
2. **Force prediction** in thread milling / A.C. Araujo, J.L. Silveira, S. Kapoor Journal // The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2004. – vol. 26 – N. 1.
3. **Araujo, A.C. Silveira J.L.** The Influence of the Specific Cutting Force on End Milling Models // Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia, MG, Brazil, 2001.

**REFERENCES**

1. **A model** for thread milling cutting forces / A.C. Araujo, J.L. Silveira, B.G. Martin Jun, S.G. Kapoor, R. DeVor // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – vol. 46 – Issue 15. – P. 2057-2065.
2. **Force prediction** in thread milling / A.C. Araujo, J.L. Silveira, S. Kapoor Journal // The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2004. – vol. 26 – N. 1.
3. **Araujo, A.C. Silveira J.L.** The Influence of the Specific Cutting Force on End Milling Models // Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia, MG, Brazil, 2001.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; одобрена после рецензирования 09.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 12.08.2022; approved after reviewing 09.10.2022; assepted for publication 14.10.2022.

