

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С.23-29.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P.23-29.

Научная статья  
УДК 621.91  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

## Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей

Александр Николаевич Унянин<sup>1</sup>, д.т.н.  
Александр Владимирович Чуднов<sup>2</sup>, аспирант  
<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»,  
Ульяновск, Россия  
<sup>1</sup> a\_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>  
<sup>2</sup> chudnov73ru@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** При механической обработке заготовок тонкостенных деталей температурное поле отличается от формирующегося при обработке массивных заготовок. Причина заключается в том, что при обработке тонкостенной заготовки ее поверхность, противоположная обрабатываемой, оказывает существенное влияние на температурное поле, поскольку интенсивность теплоотвода от этой поверхности в окружающую среду существенно меньше реализующегося при теплоотводе в нижележащие слои массивной заготовки. В связи с этим, актуальной является проблема назначения рационального режима процесса механической обработки заготовок тонкостенных деталей. Целью исследования является установление влияния элементов режима фрезерования заготовок тонкостенных деталей и шага зубьев фрезы на технологические параметры процесса фрезерования заготовок из титанового сплава и разработка рекомендаций по выбору режима фрезерования. Для этого было выполнено численное моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок массивных и тонкостенных деталей из титанового сплава при различных комбинациях подачи на зуб фрезы, скорости резания и шага зубьев фрезы. При обработке тонкостенной заготовки, вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки в заготовку, температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба, задней поверхностью зуба с заготовкой и температура заготовки выше, чем при обработке массивной заготовки. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей в зависимости от подачи, скорости резания и шага зубьев фрезы. При большем шаге фрезы средние и максимальные температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба и задней поверхности зуба с заготовкой ниже при большинстве используемых комбинациях элементов режима. Получены уравнения, устанавливающие влияние подачи на зуб фрезы, скорости резания и шага зубьев на параметры процесса обработки. Результаты исследования позволят выбрать рациональный режим фрезерования и шаг зубьев при обработке заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава.

**Ключевые слова:** фрезерование, температурное поле, режим резания, тонкостенная деталь, заготовка.

**Для цитирования:** Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

## Investigation of mode elements effect and the influence of milling cutter teeth space on technological parameters and temperature field of work on a thin-walled parts workpiece

Alexander N. Unyanin<sup>1</sup>, D. Eng.  
Alexander V. Chudnov<sup>2</sup>, PhD student  
<sup>1,2</sup> Ulyanovsk State Technical University,  
Ulyanovsk, Russia  
<sup>1</sup> a\_un@mail.ru  
<sup>2</sup> chudnov73ru@yandex.ru

**Abstract.** When machining workpieces of thin-walled parts, the temperature field differs from the field, which is formed during massive workpieces treatment. The reason for this is that machining of a thin-walled billet is interfered with its surface, being opposite to the one under machining. It has a significant effect on the temperature field, since the intensity of heat removal from this surface into the environment is significantly less than heat removal into the underlying layers of a massive material blank. In this regard, the

*problem of finding a rational mode of the machining process of thin-walled workpieces is relevant. The aim of the study is to determine the effects of the elements of the milling mode of thin-walled workpieces and milling cutter teeth space on the technological parameters of the milling process of titanium alloy workpieces and to develop recommendations for choosing this milling mode. For this purpose, a numerical modeling of the technological parameters of the milling process of blanks of massive workpieces and thin-walled parts made of titanium alloy, was performed experiencing various combinations of feed to the milling cutter tooth, cutting speed and milling cutter teeth space. When machining a thin-walled workpiece, due to less intense heat removal from the cutting zone into the workpiece, the temperatures in the areas of chip contact with the front surface of the tooth, the back surface of the tooth with the workpiece and the temperature of the workpiece itself are higher than when in a massive workpiece treatment. The patterns of changes in the parameters of the milling process of thin-walled workpieces depending on the feed, cutting speed and the milling cutter teeth space are established. With a larger tool stepover, the average and maximum temperatures in the areas of chip contact with the front surface of the tooth and the back surface of the tooth with the workpiece are lower in most of the combinations of mode elements used. Equations that establish the effect of feed on the milling cutter tooth, cutting speed and spacing of teeth on the parameters of the machining are obtained. The results of the study will allow choosing a rational milling mode and spacing of teeth in the work on workpieces of thin-walled parts made of titanium alloy.*

**Keywords:** milling, temperature field, cutting mode, thin-walled part, workpiece

**For citation:** Unyanin A.N., Chudnov A.V. Investigation of mode elements effect and the influence of milling cutter teeth space on technological parameters and temperature field of work on a thin-walled parts workpieces / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

Перспективным направлением повышения эффективности обработки заготовок тонкостенных деталей является использование фрез с неравномерным шагом зубьев, позволяющих существенно снизить уровень вынужденных колебаний, возникающих в процессе обработки. Шаг зубьев оказывает влияние на силы резания, трения и температурное поле. Однако влияние шага на данные параметры процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей не установлено.

Температурное поле при механической обработке заготовок тонкостенных деталей, отличается от поля, формирующегося при обработке заготовок деталей значительной толщины («массивных» заготовок), поскольку при обработке тонкостенных заготовок ее поверхность, расположенная напротив обрабатываемой, оказывает существенное влияние на параметры процесса, в том числе на температурное поле. Это связано с более низким уровнем теплоотвода от необрабатываемой поверхности, поскольку интенсивность теплоотвода от этой поверхности в окружающую среду существенно меньше того, который реализуется при теплоотводе в нижележащие слои массивной заготовки [1, 2].

Обеспечить работоспособность инструмента и параметры качества заготовок тонкостенных деталей возможно за счет назначения рационального режима обработки и шага зубьев фрезы, однако соответствующие рекомендации отсутствуют [3, 4].

Цель исследования – установление влияния шага зубьев при различных комбинациях элементов режима фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава на теплосиловую напряженность процесса.

Силы резания и трения рассчитывали по преобразованным зависимостям, предложенным в

работах [5, 6]. Силы зависят от предела текучести материала заготовки при температуре ее деформируемого слоя:  $\sigma_{st} = f(T_g)$ , где  $T_g$  – температура деформируемого слоя материала заготовки. Мощности и плотности источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой рассчитывали, используя зависимости [7, 8].

Для расчета параметров процесса использовали программное обеспечение, реализующее расчет температурного поля с применением метода конечных элементов. При расчете определяются температура деформируемого слоя материала заготовки  $T_g$  и предел текучести материала заготовки  $\sigma_{st}$  при этой температуре. Параметр  $\sigma_{st}$  является аргументом зависимостей для расчета сил трения и главной составляющей силы резания  $P_z$ , при этом рассчитывали силы, приходящиеся на 1,0 мм высоты зуба фрезы.

Выполнили численное моделирование параметров процесса фрезерования заготовок из титанового сплава ВТ6 цилиндрической поверхностью концевой фрезы из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм. Параметры процесса фиксировали при диспергировании заготовки 25-м из последовательно работающих зубьев фрезы. Моделировали процесс охлаждения зоны резания смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), приняв коэффициент теплоотдачи от контактирующих с СОЖ поверхностей, равным 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К); коэффициент теплоотдачи поверхностей, контактирующих с воздухом, приняли равным 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [9, 10].

Моделировали процесс фрезерования массивной заготовки толщиной 10 мм, а также тонкостенной толщиной 0,7 мм. Варьировали элементами режима: подачей на зуб фрезы  $s_z = 0,11$  и  $0,16$  мм/зуб;

скоростью резания  $v = 120$  и  $150$  м/мин; шагом зубьев  $t_z = 12,6$  и  $25,2$  мм [11].

Параметры процесса фиксировали в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой (это время зависит от элементов режима фрезерования) и в момент времени, предшествующий последнему на  $8 \times 10^{-5}$  с. В нижеприведенных таблицах представлены результаты, зафиксированные в предпоследний момент времени (числитель) и в последний момент времени контакта зуба с заготовкой (знаменатель).

Результаты расчета параметров процесса обработки «массивной» заготовки толщиной  $10$  мм

фрезой с различным шагом зубьев и тонкостенной заготовки толщиной  $0,7$  мм фрезой с шагом зубьев  $t_z = 12,6$  мм представлены в табл. 1 и табл. 2. Поскольку использованы одинаковые глубина резания и подача на зуб фрезы ( $s_z = 0,16$  мм/зуб;  $v = 150$  м/мин;  $t = 0,3$  мм;  $v_s = 1,91$  м/мин), то параметры процесса, характеризующие его кинематику, одинаковы и составляют: максимальная глубина внедрения зуба в заготовку  $a_{max} = 39,1$  мкм; длина траектории контакта зуба с заготовкой  $l_K = 2,46$  мм; максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба  $l = 125,8$  мкм.

### 1. Параметры процесса фрезерования при различном шаге зубьев и размерах (толщинах) заготовки

#### 1. Milling process parameters with different teeth distance and various dimensions (thickness) of the workpiece

Размер (толщина) заготовки, мм	Шаг $t_z$ , мм	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба $F_1$ , Н	Сила трения зуба о заготовку $F_2$ , Н	Главная составляющая силы резания $P_z$ , Н	Мощность источника тепловыделения, Вт, в зоне		
					деформирования $W_g$	контакта стружки с зубом $W_1$	контакта зуба с заготовкой $W_2$
10	12,6	38,9/45,3	54,2/54,9	99,3/107,5	77,0/89,9	58,4/68,0	162,6/164,7
10	25,2	39,1/45,3	54,5/54,9	99,9/107,5	77,4/89,9	58,7/68,0	163,5/164,6
0,7	12,6	38,8/45,2	54,0/54,7	99,0/107,2	76,7/89,6	58,1/67,8	162,0/164,1

*Примечания:*  $F_1, F_2, P_z$  – силы, приходящиеся на  $1,0$  мм высоты зуба фрезы.

### 2. Температуры при различном шаге зубьев и размерах (толщинах) заготовки

#### 2. Temperatures at different spacing of teeth and various dimensions (thickness) of the workpiece

Размер (толщина) заготовки, мм	Шаг $t_z$ , мм	Средняя температура в зоне контакта		Температура деформируемого слоя материала заготовки $T_g$ , К	Предел текучести материала заготовки $\sigma_{st}$ , МПа	Температура заготовки $T_3$ , К, на расстоянии от обрабатываемой поверхности, мкм	
		зуба с заготовкой $T_2$ , К	стружки с зубом $T_1$ , К			30	180
10	12,6	960/981	960/968,5	370/346	782/792	490/479	393/394
10	25,2	955/974	954/964	358/346	787/792	472/462	382/383
0,7	12,6	966/987	963/970	376/351	779/790	502/491	409/410

При обработке массивной заготовки фрезой с большим значением шага зубьев материал заготовки в перерыве между работой последовательно работающих зубьев остывает более продолжительное время, поэтому температура деформируемого слоя материала заготовки  $T_g$  ниже, чем при обработке фрезой с меньшим значением шага. Это является причиной увеличения предела текучести материала заготовки  $\sigma_{st}$ , сил трения и резания, мощностей и плотностей источников тепловыделения. Однако варьирование шагом не приводит к значительному изменению этих параметров при обработке массивных заготовок. Поскольку при большем значении шага зубья вступают в контакт с материалом заготовки, имеющим меньшую

температуру, поэтому средние и максимальные температуры в зонах контакта зуба с заготовкой и стружкой и температура поверхностного слоя заготовки на расстоянии  $30$  мкм от обрабатываемой поверхности ниже на  $17...18$  °.

При обработке тонкостенной заготовки, вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки в заготовку, температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба, задней поверхности зуба с заготовкой и в зоне деформирования выше, чем при обработки массивной заготовки. Увеличение температуры деформируемого слоя материала заготовки  $T_g$  приводит к снижению предела текучести материала тонкостенной заготовки  $\sigma_{st}$ . Поэтому

**Технологии механической обработки заготовок**  
**Technology and equipment of metal processing by pressure**

при фрезеровании тонкостенных заготовок несколько ниже силы трения и составляющая силы резания  $P_z$  и мощности источников тепловыделения. Однако вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки заготовок тонкостенных деталей контактные температуры несколько выше, чем при обработке массивной (см. табл. 1 и табл. 2). В большей степени увеличиваются температуры заготовки, причем чем больше расстояние от обрабатываемой поверхности,

тем больше разность температур в массивной и тонкостенной заготовке.

План численного моделирования параметров процесса обработки заготовок тонкостенных деталей при варьировании элементами режима и шагом зубьев фрезы приведен в табл. 3. В табл. 4 – 6 представлены результаты расчета параметров процесса фрезерования заготовки толщиной 0,7 мм.

**3. План численного моделирования**

**3. Computational simulation plan**

Номер эксперимента	Варьируемые параметры			
	Подача на зуб фрезы $s_z$ , мм/зуб	Скорость резания $v$ , м/мин	Шаг фрезы $t_z$ , мм	Скорость подачи $v_s$ , м/мин
1	0,11	120	12,6	1,05
2	0,16	120	12,6	1,52
3	0,11	150	12,6	1,31
4	0,16	150	12,6	1,91
5	0,11	120	25,2	0,52
6	0,16	120	25,2	0,76
7	0,11	150	25,2	0,66
8	0,16	150	25,2	0,96

**4. Технологические параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев**

**4. Technological parameters of the milling process with various elements of the mode and spacing of teeth**

Номер эксперимента	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{max}$ , мкм	Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба $l$ , мкм	Температура деформируемого слоя материала заготовки $T_g$ , К	Предел текучести материала заготовки $\sigma_{st}$ , МПа
1	26,8	76,5	385/366	776/784
2	39,0	125,8	376/354	779/789
3	26,8	86,2	388/365	774/784
4	39,0	125,8	376/351	779/790
5	26,8	86,2	383/372	776/781
6	39,0	125,4	373/361	780/785
7	26,8	86,2	384/371	776/781
8	39,0	125,8	375/361	780/786

**5. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев фрезы**

**5. Parameters of the milling process with different elements of the mode and tool stepover**

Номер эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба $F_1$ , Н	Сила трения зуба о заготовку $F_2$ , Н	Главная составляющая силы резания $P_z$ , Н	Мощность источника тепловыделения, Вт, в зоне		
				деформирования $W_g$	контакта стружки с зубом $W_1$	контакта зуба с заготовкой $W_2$
1	28,0/31,5	53,8/54,4	86,2/90,8	46,0/51,8	35,0/39,4	134,4/135,8
2	38,4/45,0	54,0/54,7	98,8/106,9	63,7/74,3	48,3/56,2	135,0/136,6
3	28,0/31,5	53,7/54,3	86,0/90,8	55,1/62,2	41,9/47,2	161,0/163,0
4	38,8/45,2	54,0/54,7	99,0/107,2	76,7/89,6	58,2/67,8	162,0/164,1
5	28,0/31,3	53,8/54,1	86,2/90,4	46,0/54,5	35,0/39,1	134,5/135,3
6	38,7/44,8	54,1/54,4	98,9/106,4	63,8/74,0	48,4/56,0	135,2/136,1
7	28,0/31,4	53,8/54,1	86,2/90,5	55,2/62,0	42,0/47,1	161,3/162,4
8	38,8/45,0	54,0/54,4	99,0/106,6	76,8/89,1	58,2/67,5	162,1/163,3

Примечания:  $F_1, F_2, P_z$  – силы, приходящиеся на 1,0 мм высоты зуба фрезы

**6. Температуры при различных элементах режима фрезерования и шаге зубьев фрезы**

**6. Temperatures at various elements of the milling mode and teeth distance of the milling cutter**

Номер эксперимента	Температура в зоне контакта зуба с заготовкой $T_2$ , К		Температура в зоне контакта стружки с зубом $T_1$ , К		Температура на вершине зуба фрезы $T_E$ , К	Температура заготовки $T_3$ , К
	средняя	максимальная	средняя	максимальная		
1	967/972	1282/1288	874/871	961/961	1025/1017	532/525
2	922/936	1301/1317	959/934	1277/1290	1019/1010	506/496
3	1042/1052	1462/1475	946/958	1305/1312	1036/1025	539/531
4	966/987	1441/1467	963/970	1384/1403	1013/1001	502/491
5	980/987	1314/1321	921/922	1206/1210	1038/1034	521/514
6	917/931	1297/1312	925/931	1273/1286	1013/1009	495/485
7	1036/1045	1459/1470	952/955	1300/1307	1028/1023	522/514
8	963/982	1441/1462	958/968	1381/1399	1005/1000	492/482

*Примечания:* температура заготовки  $T_3$  определена на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности

При увеличении подачи  $s_z$  с 0,11 до 0,16 мм/зуб (на 45 %) увеличиваются максимальная глубина внедрения зуба в заготовку  $a_{\max}$  с 26,8 до 39,0 мкм и максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба  $l$  (в среднем на 45 %). Увеличение параметров  $a_{\max}$  и  $l$  приводит к увеличению силы трения  $F_1$  и главной составляющей  $P_z$  силы резания на 35...43 % и 17...18 % соответственно. На силу трения зуба о заготовку  $F_2$  подача влияет незначительно. Вследствие увеличения сил  $F_1$  и  $P_z$  увеличиваются мощности источников тепловыделения в зонах контакта стружки с зубом  $W_1$  и в зоне деформирования  $W_g$ ; мощность источника тепловыделения в зоне контакта зуба с заготовкой  $W_2$  увеличивается незначительно.

Плотности всех источников тепловыделения увеличиваются при увеличении подачи в малой степени, поскольку изменяются не только мощности источников тепловыделения, но и их площади. Средние температуры в зоне контакта зуба с заготовкой  $T_2$ , температура на вершине зуба фрезы  $T_E$  и температура заготовки  $T_3$  почти во всех случаях незначительно уменьшаются с увеличением подачи (на 5...12 %). Это можно объяснить уменьшением времени нахождения заготовки напротив источника тепловыделения при незначительном увеличении плотностей источников тепловыделения. Средняя и максимальная температуры в зоне контакта стружки с зубом  $T_1$  увеличиваются с увеличением подачи.

При увеличении скорости резания  $v$  от 120 до 150 м/мин, т. е. на 25 %, увеличиваются мощности всех источников тепловыделения, средние и максимальные температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Следовательно, с увеличением скорости

резания  $v$  увеличивается температура поверхностного слоя заготовки.

На кинематические параметры процесса фрезерования – длину траектории контакта зуба с заготовкой  $l_k$ , максимальную глубину внедрения зуба в заготовку  $a_{\max}$  и максимальную длину контакта стружки с передней поверхностью зуба  $l$  скорость резания влияния не оказывает.

При изменении шага зубьев фрезы  $t_z$  эти параметры также не изменяются, поскольку подача на зуб фрезы одинакова.

При увеличении шага уменьшается температура деформируемого слоя материала заготовки  $T_g$  в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой. При обработке массивной заготовки  $T_g$  снижается в этот момент времени на 11,5 °; при обработке тонкостенной в меньшей степени – на 2,0...4,0 °. В последний момент времени работы зуба фрезы с большим шагом  $T_g$  выше на 5,0...10 °, чем с меньшим шагом. Это можно объяснить меньшей интенсивностью отвода теплоты при обработке тонкостенной заготовки.

Поэтому предел текучести материала заготовки  $\sigma_{st}$  в предпоследний момент времени выше при обработке фрезой с большим шагом. Однако разница температур гораздо меньше, чем при обработке массивных заготовок. В последний момент времени работы зуба параметр  $\sigma_{st}$  выше, при обработке фрезами с меньшим шагом.

Поэтому силы трения и резания и мощности источников тепловыделения несколько выше в предпоследний момент при обработке фрезой с большим шагом. В последний момент времени работы фрезы эти параметры для фрез с большим шагом ниже, однако разница несущественная.

Поэтому при большем шаге фрезы средние и максимальные температуры  $T_1$  и  $T_2$  и температура на вершине зуба фрезы  $T_E$  оказались ниже при всех используемых комбинациях элементов режима, кроме  $s_z = 0,11$  мм/зуб и  $v = 120$  м/мин.

При обработке фрезой с шагом фрезы  $t_z = 25,2$  мм температура заготовки  $T_3$  на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности ниже, чем фрезой с шагом  $t_z = 12,6$  мм.

Как и при обработке массивной заготовки, сила  $P_z$ , а также максимальные и средние температуры  $T_1$  и  $T_2$  в последний момент времени работы зуба выше, чем в предшествующий. Температура на вершине зуба фрезы  $T_E$  и температура заготовки  $T_3$  ниже в последний момент контакта зуба с заготовкой. Поэтому нижеприведенные зависимости для расчета параметра  $P_z$ , а также средних температуры  $T_1$  и  $T_2$  получены для последнего момента времени работы зуба; для расчета параметров  $T_E$  и  $T_3$  – для предыдущего.

Поскольку справочники и рекомендации содержат данные по условиям и режиму обработки массивных заготовок, при обработке тонкостенных заготовок следует использовать шаг зубьев и режим, обеспечивающие одинаковые или меньшие силы и температуры, чем при обработке массивной заготовки, при максимальной производительности.

$$\begin{aligned} T_1 &= 934,2 + 10820s_z + 748,4v + 69,032t_z - 4240s_zv - 434,9s_zt_z - 27,78vt_z + 174,6s_zvt_z; \\ T_2 &= 135,4 + 3760s_z + 428,4v + 27,032t_z - 2040s_zv - 171,4s_zt_z - 11,17vt_z + 69,84s_zvt_z; \\ T_E &= 538,6 + 3140s_z + 222,4v + 24,286t_z - 1440s_zv - 150,8s_zt_z - 9,968vt_z + 60,317s_zvt_z; \\ T_3 &= 389,8 + 920s_z + 105,2v + 5,92t_z - 720s_zv - 44,44s_zt_z - 3,397vt_z + 22,22s_zvt_z; \\ P_z &= 56,84 + 316s_z - 0,64v - 0,046t_z + 4s_zv - 0,16s_zt_z + 0,016vt_z. \end{aligned}$$

По этим зависимостям можно рассчитать режим, при котором технологические параметры при обработке тонкостенной заготовки не превысят допустимые значения.

### Выводы

1. Установлено, что при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей температурное поле значительно отличается от формирующегося при обработке массивных заготовок.

2. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей, в зависимости от подачи, скорости резания и шага зубьев фрезы.

3. Получены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования и шагом зубьев фрезы.

Например, если производить обработку заготовок тонкостенных деталей фрезой с шагом  $t_z = 25,2$  мм с режимом  $s_z = 0,16$  мм/зуб и  $v = 150$  м/мин (эксперимент № 8, см. табл. 3), то сила  $P_z$ , а также максимальные и средние температуры  $T_1$  и  $T_2$  и температуры  $T_E$  и  $T_3$  ниже, чем при обработке массивной заготовки фрезой с шагом  $t_z = 25,2$  мм. Однако производительность обработки тонкостенной заготовки со скоростью подачи  $v_s = 0,96$  м/мин будет ниже, чем массивной ( $v_s = 1,91$  м/мин) в два раза.

Если при обработке заготовок тонкостенных деталей использовать условия эксперимента № 2 по табл. 3 (фреза с шагом  $t_z = 12,6$  мм;  $s_z = 0,16$  мм/зуб;  $v = 120$  м/мин), то производительность обработки тонкостенной заготовки со скоростью подачи  $v_s = 1,52$  м/мин будет ниже, чем массивной ( $v_s = 1,91$  м/мин), на 20%. При этом максимальные и средние температуры  $T_1$ ,  $T_2$  и температура  $T_E$  ниже, чем при обработке массивной заготовки. Однако температура заготовки на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности выше, чем в массивной.

Для определения рационального режима можно использовать нижеприведенные зависимости, полученные в результате обработки результатов численного моделирования:

4. Результаты исследования позволят выбрать рациональный режим фрезерования и шаг зубьев при обработке заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Худобин Л. В. Шлифование заготовок клиновидных изделий / Л. В. Худобин, А. Ш. Хусаинов / Под общ. ред. Л. В. Худобина. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 249 с.
2. Shigeki O. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding / O. Shigeki, N. Tokuhiko, H. Shinsaki // International journal Japanese society precision engineering. 1994. Vol. 28. № 4. P. 305–310.
3. Киселёв Е.С., Имандинов Ш.А., Назаров М.В. Особенности обеспечения качества нежестких алюминиевых заготовок при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12 (207). С. 14–17.
4. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 3. С. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.

5. **Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.** Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью реза // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.

6. **Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.** Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–70.

7. **Резников А.Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

8. **Унянин А.Н.** Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 220–235.

9. **Унянин А.Н., Семдянкин И.В.** Моделирование температурного поля при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей // Инновации в машиностроении: сборник трудов 12-й междунар. научно-практич. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. С. 59–66.

10. **Жильяев А. С., Кугультинов С. Д.** Математическое моделирование тепловых процессов при фрезеровании сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей 2019. №2. С. 65–69.

11. **Балякин А.В., Хаймович А.И., Чемпинский Л.А.** Моделирование режима высокоскоростного фрезерования титанового сплава VT-9 // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т.15. № 6. С. 572–583.

## REFERENCES

1. Khudobin L. V. Grinding blanks of wedge-shaped products / L. V. Khudobin, A. Sh. Khusainov / Under the general editorship of L. V. Khudobin. Ulyanovsk: UISTU, 2007, 249 p.

2. Shigeki O. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding / O. Shigeki, N. Tokuhiko, H. Shinsaki // International journal Japanese society precision engineering. 1994. Vol. 28. № 4. P. 305–310.

3. Kiselev E.S., Imandinov Sh.A., Nazarov M.V. Quality assurance features of non-rigid aluminum blanks when milling with ultrasonic vibrations. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, No. 12, pp. 14–17.

4. Ereimekin P.A., Zhargalova A.D., Gavryushin S.S. The problem of technological deformations during milling of thin-walled workpieces // Metal processing (technology, equipment, tools). 2019, vol. 21, No. 3, pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.

5. Vorontsov A.L., Sultan-Zadeh N.M., Albagachiev A.Yu. Mathematical description of the formation of various types of the chips, pulsation of cutting force, as well as parameters of contact between the processed surface of the workpiece and the back surface of the tool / Vestnik mashinostroeniya, 2008, No. 7, pp. 56–61.

6. Vorontsov A.L., Sultan-Zadeh N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting. Practical calculations of cutting parameters in turning / Bulletin of Mechanical Engineering, 2008, No. 9, pp. 67–70.

7. Reznikov A.N. Thermal processes in technological systems / A. N. Reznikov, L. A. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 288 p.

8. Unyanin A.N. The research of a temperature field when turning with the superposition of ultrasonic vibrations // Bulletin of RSATU named after P.A. Soloviev, 2017, No.2(41), pp. 220–235.

9. Unyanin A.N., Semdyankin I.V. Modeling of the temperature field during milling blanks of thin-walled parts // Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12-th int. scientific and practical. conf. Novosibirsk: Iz-vo NSTU, 2021, pp.59–66.

10. Zhilyaev A. S., Kugultinov S. D. Mathematical modeling of thermal processes during milling of complex profile parts made of aluminum alloys // Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Al-maz-Antey, 2019, No.2, pp. 65–69.

11. Balyakin A.V., Khaimovich A.I., Champinsky L.A. Modeling of the mode of high-speed milling of titanium alloy VT-9 // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013, vol. 15, No. 6, pp. 572–583.

**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 21.06.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 27.06.2023; assepted for publication 05.07.2023.