

Влияние элементов режима резания на технологические параметры процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава

© 2024

Унянин Александр Николаевич¹, доктор технических наук, доцент
Чуднов Александр Владимирович*, аспирант

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

*E-mail: chudnov73ru@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Поступила в редакцию 03.08.2023

Принята к публикации 06.06.2024

Аннотация: Назначение рационального режима процесса механической обработки остается актуальной задачей технологической подготовки производства. Известные рекомендации и методики назначения этого режима ориентированы на обработку массивных заготовок и не учитывают того обстоятельства, что при обработке тонкостенных заготовок температуры в зоне обработки и поверхностном слое заготовки отличаются. Исследование направлено на выявление закономерностей в изменениях параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей в зависимости от элементов режима, а также разработку рекомендаций по назначению этого режима. Выполнено численное моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок массивных и тонкостенных деталей из титанового сплава при различных режимах. Варьировали скорость резания, глубину резания и подачу на зуб фрезы. Рассчитывали силу резания, мощности и плотности источников тепловыделения и температуру в поверхностном слое заготовки, в зонах контакта зуба фрезы с заготовкой и стружки с передней поверхностью зуба. Установлено, что при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей температурное поле значительно отличается от формирующегося при обработке массивных заготовок из-за низкого теплоотвода от необрабатываемой поверхности. Увеличение подачи на зуб на 45 % приводит к незначительному снижению температур в зоне резания (на 5...12 %). Увеличение скорости резания на 25 %, напротив, приводит к росту температур на 5...10 %. Увеличение глубины резания приводит к увеличению температуры в зоне контакта стружки с зубом в 1,5 раза, а также к увеличению температуры в зоне контакта зуба с заготовкой.

Ключевые слова: режим резания; технологические параметры процесса фрезерования; температурное поле; предел текучести; тонкостенная заготовка; сила резания; температура в зоне резания.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>.

Для цитирования: Унянин А.Н., Чуднов А.В. Влияние элементов режима резания на технологические параметры процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 3. С. 99–107. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-3-69-9.

ВВЕДЕНИЕ

Температурное поле, формирующееся при механической обработке заготовок тонкостенных деталей, отличается от температурного поля при обработке заготовок деталей значительной толщины [1; 2]. Причиной является то обстоятельство, что при обработке тонкостенной заготовки ее поверхность, противоположная обрабатываемой, оказывает существенное влияние на температурное поле. Однако известные рекомендации и методики назначения режима ориентированы на обработку массивных заготовок и не учитывают того, что при обработке тонкостенных заготовок температуры в зоне обработки и в поверхностном слое заготовки отличаются. Это вызвано низким уровнем теплоотвода с необрабатываемой поверхности – теплоотвод в окружающую среду существенно меньше того, который реализуется при отводе теплоты в нижележащие слои массивной заготовки [2; 3].

Знание закономерностей тепловых процессов механической обработки и умение управлять этими процессами необходимы для повышения производительности обработки и обеспечения качества обработанных деталей. Температура поверхностных слоев заготовки влияет

на их структурно-фазовый состав, микротвердость и напряженное состояние материала [4]. Температуры поверхностей инструмента, контактирующих с заготовкой и стружкой, определяют износостойкость и период стойкости инструмента, т. е. его работоспособность [5; 6]. Однако влияние тепловых процессов на процесс резания зачастую не рассматривается как значимый фактор [7; 8].

Аргументами зависимостей для расчета мощностей источников тепловыделения являются силы резания, которые, в свою очередь, зависят от механических характеристик материала обрабатываемой заготовки (предела текучести и предела прочности). Чтобы определить механические характеристики, необходимо знать температуру в области пластической деформации. Для определения этой температуры предлагается зависимость, аргументом которой являются средние касательные напряжения в условной поверхности сдвига, зависящие от температуры в этой области. Это обстоятельство затрудняет возможность определения предела текучести материала заготовки в области пластической деформации.

Обеспечить работоспособность инструмента и параметры качества заготовок тонкостенных деталей

возможно за счет назначения рационального режима обработки, однако соответствующие рекомендации в литературе отсутствуют. Исследования, связанные с определением рационального режима обработки заготовок тонкостенных деталей, учитывают упругую деформацию элементов технологической системы, в том числе самой заготовки [9; 10]. Принимаются во внимание вибрации и пульсации сил резания, что также актуально для тонкостенных заготовок [11–13]. Исследование температурных полей и влияния температур на механические свойства материала заготовки в процессе обработки проводилось для массивных заготовок [14]. Однако при этом не принималось во внимание, что температурное поле, формирующееся при обработке заготовок тонкостенных деталей, иное, чем при обработке массивных заготовок, и не учитывалось влияние температуры заготовки на предел текучести ее материала [15; 16]. В работах [17; 18] исследовались процессы обработки тонкостенных заготовок, а также заготовок сложного профиля, но не приведены рекомендации для выбора режимов резания.

Закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титановых сплавов в зависимости от элементов режима не исследованы.

Цель исследования – изучение влияния элементов режима фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава на технологические параметры процесса, в том числе на силы и температуры, возникающие в процессе обработки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Силы трения стружки о переднюю поверхность зуба, задней поверхности зуба о заготовку и главную составляющую силы резания рассчитывали по зависимостям, полученным преобразованием соответствующих зависимостей, предложенных в работах [19; 20]. Эти силы получены при условии, что оценка разрушения материала заготовки производится на основе теории пластического течения («метод пластического течения»), используемой в [12; 18]. Один из основных факторов, определяющих этот процесс – предел текучести материала заготовки, зависящий от температуры деформируемого слоя:

$$\sigma_{st} = f(T_d),$$

где T_d – температура деформируемого слоя материала заготовки, К.

Расчет параметра σ_{st} выполняли по формуле [7; 17]:

$$\sigma_{st} = \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{T_d}{T_p}\right),$$

где σ_s – напряжение текучести материала заготовки при температуре 293 К, Па; T_p – температура плавления материала, К.

Мощности и плотности источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой рассчитывали, используя зависимости [20; 21].

Приняли допущение, что материал заготовки (титановый сплав ВТ6, ближайший аналог по DIN – 3.7164) изотропен, и при расчете не учитывали фазовые превращения в процессе его нагрева. Данное допущение правомерно, поскольку численным моделированием и экспериментальным путем установлено, что температура в поверхностном слое заготовки не достигает значений, при которых происходят превращения.

Для расчета параметров процесса фрезерования использовали собственное программное обеспечение, реализующее расчет температурного поля с применением метода конечных элементов. Оно позволило рассчитать температуру деформируемого слоя материала заготовки T_d и предел текучести материала заготовки σ_{st} при этой температуре.

Время, в течение которого происходит теплообмен, разбито на конечные малые промежутки. Температура деформируемого слоя, рассчитанная для определенного момента времени, используется для расчета предела текучести материала заготовки в последующий момент времени.

Параметр σ_{st} является аргументом зависимостей для расчета сил трения и главной составляющей силы резания P_z . Рассчитывали силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы.

Адекватность физических и математических моделей, принятых при расчете температур, реальным условиям проверяли путем сравнения средней температуры в поверхностном слое обрабатываемой заготовки из титанового сплава ВТ6, полученной расчетным путем, с результатами измерения полуискусственной термопарой. Усредняя температуру поверхностных слоев массивной заготовки в различные моменты времени и в различных точках на расстоянии от поверхности заготовки, равном диаметру проволоки термопары (0,05 мм), получали среднюю расчетную температуру. Режим фрезерования: подача на зуб фрезы $S_z=0,16$ мм/зуб; скорость резания $V=120$ и 150 м/мин; глубина резания $t=0,3$ мм; скорость подачи $V_s=1,91$ м/мин. Остальные условия эксперимента соответствовали используемым при последующем численном моделировании. При скоростях $V=120$ и 150 м/мин расчетные температуры составили 686 и 701 К, экспериментальные значения – 618 и 623 К.

Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями температур, зафиксированными при различной скорости резания, не превышают 12 %, что свидетельствует о возможности использования предложенных методов для теплофизического анализа процесса фрезерования.

Выполнили численное моделирование параметров процесса фрезерования заготовок из титанового сплава ВТ6 цилиндрической поверхностью концевой фрезы из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм. Теплофизические характеристики материала заготовки и фрезы (плотность, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) в зависимости от температуры и напряжение текучести материала заготовки при температуре 293 К определяли по справочным данным. Параметры процесса фиксировали при резании заготовки двадцать пятым из последовательной череды работающих зубьев фрезы. Моделировали процесс охлаждения зоны резания смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), приняв коэффициент теплоотдачи от контактирующих с СОЖ

поверхностей равным $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; коэффициент теплоотдачи поверхностей, контактирующих с воздухом, приняли равным $40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Моделировали процесс фрезерования массивной заготовки толщиной 10 мм, а также заготовок, толщина которых после обработки составила 0,7 и 0,5 мм. Варьировали элементы режима: подачу на зуб фрезы S_z – 0,11 и 0,16 мм/зуб; скорость резания V – 120 и 150 м/мин; глубину фрезерования t – 0,3 и 0,5 мм. Параметры процесса фиксировали в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой (это время зависит от элементов режима фрезерования) и в момент времени, меньший последнего на $8 \cdot 10^{-5}$ с.

В таблице 1 приведен план численного моделирования параметров процесса обработки заготовок тонкостенных деталей при варьировании элементов режима.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования, выполненные при обработке заготовки из титанового сплава ВТ6, показали, что заготовки толщиной 10 мм и более относятся к массивным заготовкам, при обработке которых поверхность, противоположная обрабатываемой, не оказывает влияния на температурное поле в заготовке.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета параметров процесса фрезерования массивной заготовки толщиной 10 мм и тонкостенных заготовок, толщины которых после удаления припуска равны 0,7 и 0,5 мм. При данных условиях и режиме резания заметные изменения температурного поля были зафиксированы при фрезеровании заготовок, толщина которых после обработки составила 1 мм. При обработке тонкостенной заготовки температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба, задней поверхности зуба с заготовкой и в зоне деформирования выше, чем при обработке массивной заготовки. Увеличение температуры деформируемого слоя материала заго-

товки T_d приводит к снижению предела текучести материала тонкостенной заготовки σ_{st} .

В таблицах 4 и 5 представлены результаты расчета параметров процесса фрезерования заготовки толщиной 0,7 мм после удаления припуска при различных элементах режима; в таблице 6 представлены результаты расчета температур. При увеличении подачи S_z с 0,11 до 0,16 мм/зуб (на 45 %) увеличиваются максимальная глубина внедрения зуба в заготовку a_{max} (в среднем на 45 %) и максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l . Параметр l в большей степени увеличивается при глубине резания $t=0,3$ мм – на 64 %. Увеличение параметров a_{max} и l является причиной увеличения сил трения и главной составляющей P_z силы резания. Влияние подачи на силу трения зуба о заготовку F_2 незначительное; сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 и сила P_z увеличиваются на 15...42 % и 14...21 % соответственно. Это приводит к росту мощностей 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.

При повышении скорости резания V с 120 до 150 м/мин, т. е. на 25 %, мощности всех источников тепловыделения увеличиваются на 17...27 %. Это приводит к росту на 5...10 % средних и максимальных температур 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.

Увеличение глубины резания приводит к росту кинематических параметров. При увеличении параметра a_{max} увеличиваются сила трения F_1 и сила P_z , а также мощности источников тепловыделения W_1 и W_g .

Таблица 1. План численного моделирования
Table 1. Numerical simulation plan

Номер эксперимента	Варьируемые параметры			
	Подача на зуб фрезы S_z , мм/зуб	Скорость резания V , м/мин	Глубина фрезерования t , мм	Скорость подачи V_s , м/мин
1	0,11	120	0,3	1,05
2	0,16	120	0,3	1,52
3	0,11	150	0,3	1,31
4	0,16	150	0,3	1,91
5	0,11	120	0,5	1,05
6	0,16	120	0,5	1,52
7	0,11	150	0,5	1,31
8	0,16	150	0,5	1,91

Таблица 2. Параметры процесса фрезерования при различных размерах (толщинах) обработанной заготовки:
 $S_z=0,16$ мм/зуб; $V=150$ м/мин; $t=0,5$ мм; скорость подачи $V_s=1,91$ м/мин
Table 2. Milling process parameters at various sizes (thicknesses) of a processed blank:
 $S_z=0.16$ mm/tooth; $V=150$ m/min; $t=0.5$ mm; feed speed $V_s=1.91$ m/min

Размер (толщина) заготовки после обработки, 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	54,8/62,7	54,3/55,1	118,1/128,1	109,0/124,9	82,2/94,1	163,0/165,4
0,7	54,7/62,6	54,2/55,0	117,7/127,8	108,7/124,6	82,0/93,9	162,5/165,0
0,5	53,4/61,3	54,0/49,8	117,0/127,2	108,2/124,1	81,6/93,5	162,0/164,5

Примечание. F_1, F_2, P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы.

В знаменателях представлены параметры процесса, зафиксированные в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой, в числителях – в предыдущий момент.

Note. F_1, F_2, P_z are forces per 1 mm of the cutter tooth height.

The denominators represent the process parameters recorded at the last moment of contact between the cutter tooth and the blank, and the numerators represent the same parameters at the previous moment.

Таблица 3. Температуры при различных размерах (толщинах) обработанной заготовки:
 $S_z=0,16$ мм/зуб; $V=150$ м/мин; $t=0,5$ мм; $V_s=1,91$ м/мин
Table 3. Temperatures at various sizes (thicknesses) of a processed blank:
 $S_z=0.16$ mm/tooth; $V=150$ m/min; $t=0.5$ mm; $V_s=1.91$ m/min

Размер (толщина) заготовки после обработки, мм	Средняя температура в зоне контакта		Температура деформируемого слоя материала заготовки T_{ds} , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа	Температура заготовки T_3 , К на расстоянии от обрабатываемой поверхности	
	зуба с заготовкой T_2 , К	стружки с зубом T_1 , К			30 мкм	180 мкм
10	1 000/1 018	1 004/1 012	365/337	784/796	484/478	389/390
0,7	1 006/1 023	1 008/1 013	371/341	782/794	497/ 491	406/406
0,5	1 014/1 031	1 014/1 015	379/347	778/791	514/506	425/425

Примечание. В знаменателях представлены параметры процесса, зафиксированные в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой, в числителях – в предыдущий момент.

Note. The denominators represent the process parameters recorded at the last moment of contact between the cutter tooth and the blank, and the numerators represent the same parameters at the previous moment.

На силу трения F_2 и мощность источника W_2 изменение глубины резания не влияет.

С увеличением глубины резания среднее значение температуры T_2 уменьшается при $S_z=0,11$ мм/зуб и увеличивается при $S_z=0,16$ мм/зуб. Максимальное значение температуры T_2 увеличивается при всех комбинациях параметров S_z и V , кроме $S_z=0,11$ мм/зуб и $V=150$ м/мин. Температура заготовки T_3 на глубине 30 мкм увеличивается с ростом глубины резания при всех комбинациях параметров S_z и V , кроме $S_z=0,16$ мм/зуб и $V=150$ м/мин. Температура на вершине зуба T_E незначительно снижается с ростом параметра t , кроме расчета при режиме $S_z=0,11$ мм/зуб и $V=120$ м/мин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При фрезеровании тонкостенных заготовок сила резания P_z и мощности источников тепловыделения несколько ниже вследствие меньшего значения параметра σ_{st} . Однако из-за менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки заготовок тонкостенных деталей контактные температуры несколько выше [3], чем при обработке массивных (таблицы 2 и 3). В большей степени увеличиваются температуры в поверхностном слое заготовки, причем чем больше расстояние от обрабатываемой поверхности, тем больше разность температур массивной и тонкостенной заготовок.

Таблица 4. Технологические параметры процесса при различных элементах режима фрезерования
 Table 4. Process technological parameters at various milling mode elements

Номер эксперимента по таблице 3	Длина траектории контакта зуба с заготовкой l_k , мм	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_d , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа
1	2,46	26,8	76,5	385/366	776/784
2	2,46	39,0	125,8	376/354	779/789
3	2,46	26,8	85,2	388/365	774/784
4	2,46	39,0	125,8	376/351	779/790
5	3,18	34,4	111,0	394/365	772/784
6	3,18	50,1	161,5	371/345	781/792
7	3,18	34,4	111,5	396/363	781/792
8	3,18	50,1	161,5	371/341	782/794

Примечание. В знаменателях представлены параметры процесса, зафиксированные в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой, в числителях – в предыдущий момент.

Note. The denominators represent the process parameters recorded at the last moment of contact between the cutter tooth and the blank, and the numerators represent the same parameters at the previous moment.

Таблица 5. Параметры процесса при различных элементах режима фрезерования
 Table 5. Process parameters at various milling mode elements

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	39,8/44,1	53,5/54,3	99,6/105,5	65,6/72,8	49,7/55,1	133,7/135,8
6	54,0/61,7	54,2/54,9	116,9/126,7	89,4/102,4	67,5/77,1	135,4/137,3
7	39,7/44,1	53,4/54,4	99,5/105,6	78,6/87,4	59,6/66,2	160,3/163,2
8	54,7/62,6	54,2/55,0	117,7/127,8	108,7/124,6	82,0/93,9	162,5/165,0

Примечание. F_1 , F_2 , P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы.

В знаменателях представлены параметры процесса, зафиксированные в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой, в числителях – в предыдущий момент.

Note. F_1 , F_2 , P_z are forces per 1 mm of the cutter tooth height.

The denominators represent the process parameters recorded at the last moment of contact between the cutter tooth and the blank, and the numerators represent the same parameters at the previous moment.

Таблица 6. Температуры при различных элементах режима фрезерования
Table 6. Temperatures at various milling mode elements

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	1 282/1 288	874/871	961/961	1 025/1 017	532/525
2	922/936	1 301/1 317	959/934	1 277/1 290	1 019/1 010	506/496
3	1 042/1 052	1 462/1 475	946/958	1 305/1 312	1 036/1 025	539/531
4	966/987	1 441/1 467	963/970	1 384/1 403	1 013/1 001	502/491
5	957/960	1 285/1 294	948/946	1 273/1 277	1 034/1 024	542/537
6	956/969	1 330/1 348	967/970	1 380/1 393	1 014/1 001	507/500
7	1 011/1 017	1 424/1 437	986/985	1 380/1 388	1 027/1 016	539/535
8	1 006/1 023	1 477/1 504	1 008/1 013	1 506/1 528	1 008/991	497/491

Примечание. Температура заготовки T_3 определена на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности.

В знаменателях представлены параметры процесса, зафиксированные в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой, в числителях – в предыдущий момент.

Note. Blank temperature T_3 was determined at a distance of 30 μm from the processed surface.

The denominators represent the process parameters recorded at the last moment of contact between the cutter tooth and the blank, and the numerators represent the same parameters at the previous moment.

Плотности всех источников тепловыделения увеличиваются незначительно, поскольку с увеличением подачи увеличиваются 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.

Температура заготовки на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности с ростом скорости V не изменяется либо несколько снижается, что объясняется уменьшением времени действия теплового источника на заготовку.

В последний момент времени контакта зуба с заготовкой температура деформируемого слоя несколько ниже, чем в предшествующий. Это является следствием того, что зуб вступает в контакт с материалом заготовки, в меньшей степени нагретым в результате работы предшествующих зубьев. Поэтому в последний момент времени предел текучести σ_{st} выше, как, следовательно, и силы резания и трения, мощности и плотности источников тепловыделения. При всех режимах фрезерования значения средней и максимальной температуры T_2 в этот момент времени выше, чем в предыдущий. Температура заготовки T_3 , температура на вершине зуба T_E и температура деформируемого слоя в последний момент времени несколько ниже, чем в предшествующий.

Максимальное значение температуры T_1 выше в последний момент времени, а среднее значение этой температуры изменяется незначительно. Поэтому нижеприведенные зависимости для оценки параметров процесса получены для: среднего значения температуры T_2 и силы P_z , зафиксированных в последний момент времени контакта; температур T_E и T_3 в предшествующий момент; при расчете средней температуры T_1 оперировали усредненной для двух моментов времени температурой.

При обработке заготовок тонкостенных деталей следует использовать режим, обеспечивающий силы и температуры, не превышающие те, которые имеют место при обработке массивных [14] заготовок при максимальной производительности.

Выполненные исследования позволяют подобрать необходимый режим. Например, если использовать режим № 6 по таблице 3 ($t=0,5$ мм; $S_z=0,16$ мм/зуб и $V=120$ м/мин), то сила P_z , а также средние и максимальные значения температур T_1 и T_2 ожидаются ниже, чем при обработке массивной заготовки (таблицы 2 и 3). При этом скорость подачи снизится с 1,91 до 1,52 м/с, т. е. производительность при обработке тонкостенной заготовки несколько уменьшится. Имеются и другие режимы обработки тонкостенной заготовки, обеспечивающие меньшие силы P_z и температуры в сравнении с обработкой массивной, однако при этих режимах существенно снижается производительность.

Рекомендации, касающиеся обработки тонкостенных заготовок, привести затруднительно вследствие неоднозначного влияния на параметры процесса какого-либо элемента режима при различных комбинациях других. Поэтому для определения рационального

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

$$T_1 = 223.9 + 1141.3 \cdot S_z + 31.095 \cdot V + 272 \cdot t - 141.3 \cdot S_z \cdot V - 2400 \cdot S_z \cdot t - 30.68 \cdot V \cdot t + 355.56 \cdot S_z \cdot V;$$

$$T_2 = 1320 + 13110 \cdot S_z + 905.4 \cdot V + 4184 \cdot t - 5340 \cdot S_z \cdot V - 25900 \cdot S_z \cdot t - 16900 \cdot V \cdot t + 11000 \cdot S_z \cdot V;$$

$$T_E = 439.3 + 3820 \cdot S_z + 296.6 \cdot V + 1351 \cdot t - 1760 \cdot S_z \cdot V - 8600 \cdot S_z \cdot t - 576 \cdot V \cdot t + 3000 \cdot S_z \cdot V;$$

$$T_3 = 306.9 + 1110 \cdot S_z + 118.8 \cdot V + 525 \cdot t - 680 \cdot S_z \cdot V - 2500 \cdot S_z \cdot t - 188 \cdot V \cdot t + 800 \cdot S_z \cdot V \cdot t;$$

$$P_z = 37.12 + 1141.3 \cdot S_z + 6.52 \cdot V + 63.8 \cdot t - 62 \cdot S_z \cdot V - 70 \cdot S_z \cdot t - 23.2 \cdot V \cdot t + 220 \cdot S_z \cdot V \cdot t.$$

С помощью этих зависимостей можно рассчитать режим, при котором технологические параметры при обработке тонкостенной заготовки не превысят допустимые значения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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 элементов режима.

3. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь температур и сил резания с элементами режима фрезерования.

4. Результаты исследований и полученные зависимости позволяют определить режим обработки тонкостенной заготовки, при котором технологические параметры, в том числе температуры, не превысят допустимых значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Худобин Л.В., Хусаинов А.Ш. Шлифование заготовок клиновидных изделий. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 249 с.
- Hishihara T., Okuyama S., Kawamura S., Hanasaki S. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding // International journal Japanese society precision engineering. 1993. Vol. 59. № 7. P. 1145–1150. DOI: [10.2493/jjspe.59.1145](https://doi.org/10.2493/jjspe.59.1145).
- Куц В.В., Гридин Д.С. Комплексное исследование процесса нарезания винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической тонкостенной бронзовой втулки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 72–79. EDN: [PXWMTS](https://www.edn.ru/pxwmts).
- Ладыгин Р.В., Якимов М.В. Исследование влияния силы и температуры в процессе высокоскоростного резания на точность обработки гильзы блока цилиндров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 3. С. 111–115. DOI: [10.37313/1990-5378-2020-22-3-111-115](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-111-115).
- Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 3. С. 44–58. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22-3-44-58](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22-3-44-58).
- Duan Zhenjing, Li Changhe, Ding Wenfeng et al. Milling Force Model for Aviation Aluminum Alloy: Academic Insight and Perspective Analysis // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 34. Article number 18. DOI: [10.1186/s10033-021-00536-9](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00536-9).
- Radu P., Schnakovszky C. A Review of Proposed Models for Cutting Force Prediction in Milling Parts with Low Rigidity // Machines. 2024. Vol. 12. № 2. Article number 140. DOI: [10.3390/machines12020140](https://doi.org/10.3390/machines12020140).
- Zawada-Michałowska M., Kuczmaszewski J., Legutko S., Pieško P. Techniques for Thin-Walled Element Milling with Respect to Minimising Post-Machining Deformations // Materials. 2020. Vol. 13. № 21. Article number 4723. DOI: [10.3390/ma13214723](https://doi.org/10.3390/ma13214723).
- 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](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21-3-17-27).
- 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. С. 14–17. EDN: [ZVLFAR](https://www.edn.ru/zvlfar).
- Васильков Д.В., Александров А.С., Голикова В.В. Автоколебания при обработке резанием // Системный анализ и аналитика. 2018. № 3. С. 25–35. EDN: [YNNEGL](https://www.edn.ru/ynneql).
- Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 7. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–60. EDN: [JVNRFJ](https://www.edn.ru/jvnrfj).
- Chen Tao, Liu Jiaqiang, Liu Gang, Xiao Hui, Li Chunhui, Liu Xianli. Experimental Study on Titanium Alloy Cutting Property and Wear Mechanism with Circular-arc Milling Cutters // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 36. Article number 57. DOI: [10.1186/s10033-023-00887-5](https://doi.org/10.1186/s10033-023-00887-5).
- Балякин А.В., Хаймович А.И., Чемпинский Л.А. Моделирование режима высокоскоростного фрезерования титанового сплава BT-9 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-3. С. 572–583. EDN: [SHQPHB](https://www.edn.ru/shqphb).
- Евдокимов Д.В., Скуратов Д.Л., Букатый А.С. Расчетное прогнозирование технологических остаточных деформаций лопаток ГТД на этапе конечного

- фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 1. С. 11–19. DOI: [10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19).
16. Васильков Д.В., Александров А.С., Голикова В.В. Реология контактных взаимодействий при обработке резанием // Системный анализ и аналитика. 2018. № 2. С. 13–20. EDN: [YVMXEW](https://www.edn.ru/yvmxew).
 17. Унянин А.Н., Семдянкин И.В. Моделирование параметров и температурного поля процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей с различными скоростями подачи // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2021. № 1. С. 40–43. EDN: [TCGJNX](https://www.edn.ru/tcgjnx).
 18. Жияев А.С., Кугультинов С.Д. Математическое моделирование тепловых процессов при фрезеровании сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 2. С. 65–70. EDN: [FKRVYF](https://www.edn.ru/fkrvyf).
 19. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 9. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–76. EDN: [JVNSAD](https://www.edn.ru/jvnсад).
 20. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
 21. Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 229–235. EDN: [YPZFHX](https://www.edn.ru/ypzfhx).
- REFERENCES**
1. Khudobin L.V., Khusainov A.Sh. *Shlifovanie zagotovok klinovidnykh izdeliy* [Grinding of blanks of wedge products]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2007. 249 p.
 2. Hishihara T., Okuyama S., Kawamura S., Hanasaki S. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding. *International journal Japanese society precision engineering*, 1993, vol. 59, no. 7, pp. 1145–1150. DOI: [10.2493/jjspe.59.1145](https://doi.org/10.2493/jjspe.59.1145).
 3. Kuts V.V., Gridin D.S. Comprehensive study of the process of cutting screw grooves on the inner surface of a cylindrical thin-walled bronze bushing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 10, pp. 72–79. EDN: [PXWMTS](https://www.edn.ru/pxwmts).
 4. Ladyagin R.V., Yakimov M.V. Study of the effect of force and temperature in the process of high-speed cutting on the accuracy of treatment of the cylinder blade case. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 111–115. DOI: [10.37313/1990-5378-2020-22-3-111-115](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-111-115).
 5. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibration in metal turning. *Obrabotka metallov / Metal working and material science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22-3-44-58](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22-3-44-58).
 6. Duan Zhenjing, Li Changhe, Ding Wenfeng et al. Milling Force Model for Aviation Aluminum Alloy: Academic Insight and Perspective Analysis. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 34, article number 18. DOI: [10.1186/s10033-021-00536-9](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00536-9).
 7. Radu P., Schnakovszky C. A Review of Proposed Models for Cutting Force Prediction in Milling Parts with Low Rigidity. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 2, article number 140. DOI: [10.3390/machines12020140](https://doi.org/10.3390/machines12020140).
 8. Zawada-Michałowska M., Kuczmaszewski J., Legutko S., Pieško P. Techniques for Thin-Walled Element Milling with Respect to Minimising Post-Machining Deformations. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 21, article number 4723. DOI: [10.3390/ma13214723](https://doi.org/10.3390/ma13214723).
 9. Eremykin P.A., Zhargalova A.D., Gavryushin S.S. Problem of technological deformations of thin-walled workpieces during milling. *Obrabotka metallov / Metal working and material science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 17–27. DOI: [10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27).
 10. Kiselev E.S., Imandinov Sh.A., Nazarov M.V. Quality assurance features non-rigid aluminum blanks when milling with ultrasonic vibrations. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 12, pp. 14–17. EDN: [ZVLFAR](https://www.edn.ru/zvlfar).
 11. Vasilkov D.V., Aleksandrov A.S., Golikova V.V. Self-oscillations during cutting processing. *Sistemnyy analiz i analitika*, 2018, no. 3, pp. 25–35. EDN: [YNNEGL](https://www.edn.ru/ynnegl).
 12. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 7. Mathematical description of the formation of different chips, pulsation of the cutting force, and contact parameters of the machined billet surface and the rear cutter surface. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 674–680. DOI: [10.3103/S1068798X08070101](https://doi.org/10.3103/S1068798X08070101).
 13. Chen Tao, Liu Jiaqiang, Liu Gang, Xiao Hui, Li Chunhui, Liu Xianli. Experimental Study on Titanium Alloy Cutting Property and Wear Mechanism with Circular-arc Milling Cutters. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 36, article number 57. DOI: [10.1186/s10033-023-00887-5](https://doi.org/10.1186/s10033-023-00887-5).
 14. Balyakin A.V., Khaymovich A.I., Chempinskiy L.A. Modeling of the high-speed milling of titanium alloy VT-9. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 6-3, pp. 572–583. EDN: [SHOPHB](https://www.edn.ru/shophb).
 15. Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Bukatyy A.S. Technological residual deformations prediction of GTE blades by numerical method after end milling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 11–19. DOI: [10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19).
 16. Vasilkov D.V., Aleksandrov A.S., Golikova V.V. Rheology of contact interactions during cutting processing. *Sistemnyy analiz i analitika*, 2018, no. 2, pp. 13–20. EDN: [YVMXEW](https://www.edn.ru/yvmxew).
 17. Unyanin A.N., Semdyankin I.V. Modeling of parameters and temperature field of the process of milling blanks of thin-walled parts with different feed speeds. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 40–43. EDN: [TCGJNX](https://www.edn.ru/tcgjnx).
 18. Zhilyaev A.S., Kugultinov S.D. Mathematical simulation of thermal processes when milling aluminum alloy formed parts. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey"*, 2019, no. 2, pp. 65–70. EDN: [FKRVYF](https://www.edn.ru/fkrvyf).
 19. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 9. Practical calculations of cutting parameters in turning. *Russian En-*

- gineering Research, 2008, vol. 28, no. 9, pp. 878–888. DOI: [10.3103/S1068798X08090116](https://doi.org/10.3103/S1068798X08090116).
20. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v technologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in manufacturing systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p.
21. Unyanin A.N. Analytical research on the temperature field at milling with ultrasonic oscillations superposition. *Vestnik RGATU im. P.A. Soloveva*, 2017, no. 2, pp. 229–235. EDN: [YPZFHX](https://www.edn.ru/ypzfhx/).

The influence of cutting mode elements on the technological parameters of the process of milling blanks of titanium alloy thin-walled parts

© 2024

*Aleksandr N. Unyanin*¹, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor
*Aleksandr V. Chudnov**, postgraduate student

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

*E-mail: chudnov73ru@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Received 03.08.2023

Accepted 06.06.2024

Abstract: The purpose of a rational mechanical processing mode remains an urgent task of pre-production engineering. Known recommendations and methods for selecting this mode are focused on the processing of solid blanks and do not take into account the fact that when processing thin-walled blanks, the temperatures in the processing zone and the surface layer of the blank differ. The study is aimed at identifying patterns in changing the parameters of the milling process of thin-walled blanks depending on the mode elements, as well as developing recommendations for selecting this mode. The authors performed numerical simulation of technological parameters of the milling process of solid and thin-walled blanks made of titanium alloy under various modes. The cutting speed, cutting depth and feed per cutter tooth were varied. The cutting force, power and densities of heat sources and the temperature in the surface layer of the blank, in the contact zones of the cutter tooth with the blank and the chips with the front surface of the tooth were calculated. It has been found that when milling thin-walled blanks, the temperature field differs significantly from that formed when processing solid blanks due to low heat removal from the unprocessed surface. Increasing the feed per tooth by 45 % leads to an insignificant decrease in temperatures in the cutting zone (by 5...12 %). Increasing the cutting speed by 25 %, on the contrary, leads to an increase in temperatures by 5...10 %. Increasing the cutting depth leads to an increase in the temperature in the chip-tooth contact zone by 1.5 times and to an increase in the temperature in the tooth-blank contact zone.

Keywords: cutting mode; technological parameters of milling process; temperature field; yield strength; thin-walled blank; cutting force; cutting zone temperature.

Acknowledgements: The study was carried out with a grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>.

For citation: Unyanin A.N., Chudnov A.V. The influence of cutting mode elements on the technological parameters of the process of milling blanks of titanium alloy thin-walled parts. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 3, pp. 99–107. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-3-69-9.