

К ВОПРОСАМ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ И ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

© 2019

Е.С. Киселев, доктор технических наук, профессор

М.В. Назаров, аспирант

Н.В. Мезин, магистрант

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: обработка нежестких заготовок; режимы резания; титановые сплавы ВТ6, ВТ22, α -Ti, β -Ti; технологические остаточные напряжения; ультразвуковые колебания; фазовый состав.

Аннотация: Рассмотрены проблемы технологической подготовки обработки заготовок нежестких деталей (НД) машин. Предложена методика назначения режимов фрезерования с учетом условий жесткости, реализуемая через определение возможных сочетаний элементов режима резания. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на упругие отжиги элементов заготовки в процессе обработки. Разработана и апробирована экспериментальная установка с тонкой стенкой высотой, равной 15 и более ее толщине, позволяющая осуществлять обработку типовых заготовок с введением в зону резания энергии ультразвукового поля. Проведены экспериментальные исследования по обработке титанового сплава ВТ6 с последующей оценкой уровня технологических остаточных напряжений (ТОН) поверхностного слоя (ПС) обработанной поверхности и изменений фазового состава (ФС). Осуществлена оценка влияния элементов режима резания на ТОН и ФС при введении энергии ультразвукового поля в зону формирования ПС поверхностей нежестких деталей. Приведены регрессионные зависимости для расчета составляющих силы резания, уровня ТОН в зависимости от элементов режима резания.

Установлено, что при разработке управляющих программ современных станков с ЧПУ имеется возможность осуществления автоматизированного назначения режима фрезерования элементов заготовок нежестких деталей машин с учетом условий их жесткости. Адекватность методики доказана при сравнении с результатами САЕ-анализа.

Увеличение минутной подачи при фрезеровании заготовок из титанового сплава ВТ6 приводит к улучшению его эксплуатационных свойств (жаропрочности) за счет увеличения содержания β -титана, еще большему росту способствует введение в зону резания УЗК.

ВВЕДЕНИЕ

Существующая тенденция к снижению материалоёмкости выпускаемых изделий, возрастающие потребности промышленности в упругих элементах различных устройств обусловили одновременно непрерывный рост объема производства нежестких деталей высокой точности (в том числе корпусных). Помимо нежестких деталей, которые деформируются после изготовления до такой степени, что в свободном состоянии могут выходить за пределы допусков размеров и (или) формы и расположения, и относятся к нежестким деталям по ГОСТ 30937-2003, в конструкциях современных изделий машиностроения достаточно часто используются детали, не попадающие под определение данного ГОСТа, но состоящие из большого количества сложно сочетаемых «нежестких элементов», обработка которых по отдельности вызывает существенные затруднения, а в сочетании с подобными по жесткости элементами – делает себестоимость их изготовления в соответствии с требованиями чертежа весьма затратной и трудоемкой [1; 2]. Основными материалами, из которых изготавливаются подобные детали, являются алюминиевые и титановые сплавы, имеющие особенности обработки. Алюминиевые сплавы фрезеруются при больших скоростях резания, сопровождаемых высокими температурами, что приводит к пластификации металла (в виду низкой температуры плавления), к большим температурным напряжениям и короблению из-за малого предела текучести. Благодаря высокой теплопроводности осуществляется прогрев больших объемов материала заготовки, приводящий к значительному облегчению процесса релаксации остаточных напряжений, что в конечном

итоге ведет к деформации и короблению готовых деталей после завершения технологического цикла их изготовления. Титановые сплавы, напротив, обладают низкой теплопроводностью и трудно обрабатываются, вследствие чего большое количество теплоты, образующейся в зоне формообразования, концентрируется в тонких поверхностных слоях обрабатываемой заготовки. Все это приводит к фазовым превращениям и появлению значительных технологических остаточных напряжений в поверхностном слое, что в дальнейшем оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства деталей [6–8]. При этом наиболее трудоемким процессом является не сама механическая обработка, а технологическая подготовка производства, особенно проектирование управляющих программ для обрабатывающих центров и станков с ЧПУ [9; 10]. Данный процесс частично автоматизирован, но существующие решения не могут быть применены к обработке как заготовок нежестких деталей машин, так и заготовок деталей с нежесткими элементами [11].

Цель работы – оценка возможности автоматизации процесса технологической подготовки производства нежестких деталей машин для дальнейшего прогнозирования состояния поверхностного слоя после обработки и отбор эффективных средств снижения эксплуатационных характеристик и уменьшения причин коробления нежестких деталей машин в процессе изготовления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Автоматизировать процесс проектирования программ обработки подобных заготовок можно путем рационального использования опыта групп пользователей

(программистов цеха, предприятия, отрасли), ранее осуществлявших решение подобных задач. Опыт может быть представлен в виде наборов входных и выходных параметров, формирующих пополняемую структурированную базу данных и пригодную для оперативного поиска. Входными параметрами являются данные из математической модели детали, информация о материале заготовки и металлорежущем оборудовании. К выходным относятся технологические подходы и элементы режима резания, при котором осуществляется обработка выбранных элементов.

Алгоритм формирования набора входных данных

Формирование базы данных осуществляется автоматически посредством фонового сканирования готовых технологий и извлечения из нее наборов параметров. Пример набора параметров представлен в таблице 1.

В процессе формирования базы данных возникает несколько трудностей: существуют наборы с неадекватными выходными параметрами (нулевые значения режима резания) и наборы с отсутствующей информацией о материале обрабатываемой заготовки и данных о режиме резания. Для минимизации количества отсеиваемых наборов предлагается прогнозирование укрупненных групп обрабатываемости материала заготовки через введение условного коэффициента k , попадание которого в один из интервалов говорит о принадлежности наборов к той или иной группе обрабатываемости материала заготовки: $300 < k < 800$ (стали), $4700 < k < 14000$ (алюминиевые сплавы), $880 < k < 1500$ (сплавы титана) [2]:

$$k = \frac{Vc}{Fz}$$

Процесс проектирования программы обработки заготовки НД начинается с загрузки модели детали в САМ-систему и назначения материала заготовки. Далее выбирается обрабатываемый элемент. После выбора формируется набор параметров запроса: материал заготовки, тип обрабатываемого элемента, длина контура выбранного элемента, глубина/высота элемента. Согласно полученным данным осуществляется поиск подходящего решения в базе данных.

Алгоритм поиска рационального режима резания

После получения подобранного набора входных выходных параметров осуществляется проверка условий жесткости. В автоматическом режиме определяется максимальное отклонение стенки C под действием радиальной составляющей силы резания P_y (рис. 1) [12; 13].

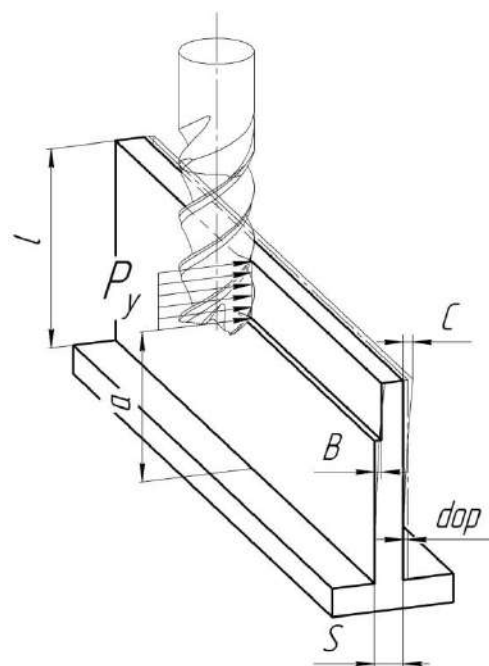


Рис. 1. Схема нагружения стенки силой P_y для определения максимального отклонения C

$$C = -\frac{P_y l^4}{24EI} \left(3 - 4 \frac{a^3}{l^3} + \frac{a^4}{l^4} \right);$$

$$P_y = 0,3 \times P_z = 0,3 \times \frac{10 \times C_p \times t^{Zp} \times S_z^{np} \times B^{up}}{D^{qp} \times n^{wp}} \times K_p;$$

$$K_p = \left(\frac{HB}{190} \right)^{np}$$

- где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н;
- l – высота стенки, мм;
- E – модуль упругости, МПа;
- I – момент инерции сечения стенки, кг/м²;
- a – расстояние от основания стенки до участка, на который действует P_y , мм;
- b – ширина участка приложения силы P_y , равная глубине фрезерования, мм;
- P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;
- T – глубина фрезерования, мм;
- S_z – подача на зуб, мм/об;
- B – ширина фрезерования, мм;
- D – диаметр фрезы, мм;
- N – частота вращения фрезы, об/мин;

Таблица 1. Пример набора входных данных для расчета

N	Mat	Type	Vc	Fz	Ins	St	Pr	...	Prip
1	D16	Rough	320	0,03	2	1	64	...	0,3
...

* Mat – материал обрабатываемой заготовки; Type – тип обработки (предварительная или окончательная); Vc – скорость резания, м/мин; Fz – подача на зуб, мм/зуб; Ins – тип врезания (осевое в материал, по спирали, с воздуха); St – глубина резания, мм; Pr – процент перекрытия траектории, %; Prip – припуск на окончательную обработку, мм.

C_p – коэффициент, справочные данные;
 z_p, y_p, i_p, q_p, w_p – показатели степени, справочные данные [14; 15].

Условие принятия или непринятия набора представлено в виде:

$$C_{max} = 0,8 \times \frac{dop}{2},$$

где dop – максимально допустимое отклонение линейного размера обрабатываемого элемента, мм;
 0,8 – коэффициент, обеспечивающий запас 20 %.

Если расчетное значение отклонения стенки выходит за пределы допустимого, осуществляется пересчет режима резания.

Варируется глубина фрезерования T , ширина фрезерования B , а также подача на зуб S_z . Данные параметры изменяются в пределах, рекомендованных производителем режущих инструментов (РИ). Шаг варьирования для S_z – 0,002 мм/зуб, для T и B – 0,1 мм. Для каждого шага рассчитывается отжатие стенки C и сравнивается с допустимым C_{max} .

Следующим шагом в процессе принятия решения является определение эффективности рассчитанного режима резания. Для всех наборов параметров T, B, S_z рассчитывается величина съема материала в минуту $Q, \text{см}^3/\text{мин}$:

$$Q = \frac{T \times B \times S_z \times n \times N_z}{1000},$$

где N_z – число зубьев фрезы.

Рациональный набор элементов режима резания выбирается исходя из условия $C \leq C_{max}$ и наибольшего значения Q .

В таблице 2 представлен пример рассчитанных наборов элементов режима резания.

После нахождения набора параметров, адекватных для рассматриваемого случая механической обработки (рис. 2), осуществляется генерация траекторий перемещения режущего инструмента, а затем демонстрация их пользователю для подтверждения и вывод данных на постпроцессор для дальнейшей передачи информации на станок с ЧПУ.

Найденному набору параметров присваиваются значения условий (геометрические параметры элемента, материал заготовки, величина снимаемого припуска), при которых его можно использовать без дополнительного расчета условий жесткости. Приведенный алгоритм сбора и использования наборов параметров позволяет минимизировать возможность появления брака на деталях, связанного с отклонением расположения и формы стенок, а также с шероховатостью и волнисто-

стью, значение которых превышает значения, требуемые чертежом детали.

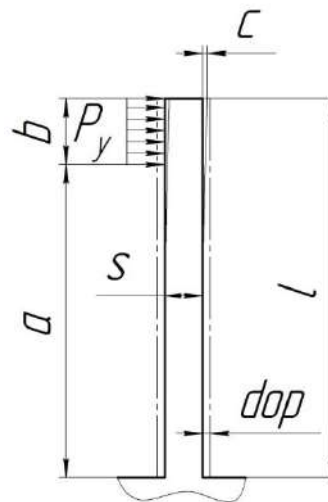


Рис. 2. Схема нагружения, при котором набор параметров принимается в работу

Метод снижения теплосиловой напряженности в зоне резания

Как следует из вышеприведенного, наибольшее влияние на максимальное отклонение стенки C оказывает составляющая силы резания P_y . Перспективным решением проблем уменьшения теплосиловой напряженности процесса обработки нежестких заготовок из титановых сплавов, от которой зависит величина P_y , видится применение комбинированных технологий, реализуемых путем управляемого дополнительного воздействия на инструмент и/или технологическую среду концентрированных потоков дополнительной энергии, в том числе механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты [16–19].

Проверку эффективности введения энергии УЗ-поля в зону формообразования нежестких тонкостенных заготовок на силы резания и фазовые превращения, являющиеся основной причиной возникновения технологических остаточных напряжений в современных конструкционных материалах для изготовления нежестких тонкостенных деталей, осуществляли при фрезеровании модельных заготовок (рис. 2) из титановых сплавов ВТ6 и ВТ22. Технологические остаточные напряжения измеряли с использованием рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-4», фазовые изменения – «Рикор-7», составляющие силы резания – универсальным динамометром УДМ-100.

Таблица 2. Пример таблицы найденных решений с выделением оптимального

№	$B, \text{мм}$	$T, \text{мм}$	$S_z, \text{мм/зуб}$	$C, \text{мм}$	$Q, \text{см}^3/\text{мин}$
1	1,0	10,0	0,030	0,0486	2,70
2	0,5	12,5	0,030	0,0320	1,69
3	0,5	10,0	0,046	0,0319	2,07
4	1,0	5,50	0,060	0,0311	2,97

*при $C_{max} = 0,032 \text{ мм}$

Сплавы ВТ6 и ВТ22 имеют кристаллическую решетку смешанного класса по структуре $\alpha+\beta$.

Для обработки заготовок использовали в качестве РИ концевую фрезу *SGS65M* (диаметр режущей части $d_f=8$ мм; количество зубьев $z=3$; материал – специальный мелкозернистый твердый сплав; покрытие *Ti-NA MITE-A* (алюмонитрид титана)). Устройство для наложения УЗ-колебаний на заготовку при фрезеровании представляет собой специальное станочное приспособление (рис. 3).

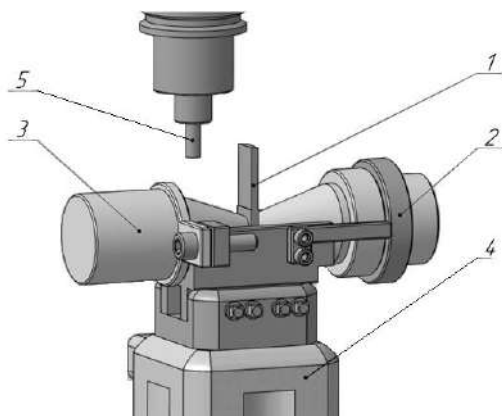


Рис. 3. Приспособление для закрепления заготовки:
1 – заготовка образца; 2 – УЗ-излучатель;
3 – отражатель; 4 – динамометр УДМ-100; 5 – фреза

Заготовка 1 устанавливается на кронштейн и поджимается отражателем 3 к волноводу УЗ-излучателя 2 винтами. Электрический сигнал определенной амплитуды и частоты вырабатывается с помощью УЗ-генератора, преобразуется в механические ультразвуковые колебания с помощью УЗ-излучателя 2 и накладывается на заготовку 1. Измерение составляющих силы резания осуществляется динамометром 4, сигнал от которого проходит через усилитель 6, поступает на аналогово-цифровой преобразователь и затем регистрируется на ЭВМ. Особенность данной схемы наложения ультразвуковых колебаний (рис. 3) заключается в том, что заготовка, установленная между излучателем и отражателем, является звеном колебательной системы. При этом размеры излучателя и отражателя рас-

считаны так, чтобы на заготовке возникал максимум амплитуды стоячей волны.

В качестве СОЖ использовали 8%-ный водный раствор полусинтетического концентрата фирмы *Cimcool*. Расчет числа параллельных опытов в серии производили, используя «Методику выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов» (РДМУ 109-77). По результатам расчета принимали число параллельных опытов $n_0=3$.

В процессе исследований силы резания технологические остаточные напряжения и фазовый состав в поверхностном слое нежестких деталей оценивали при обработке заготовок на режимах: $V=21-41$ м/мин, $S=55-74$ мм/мин, $t=0,5-1$ мм. Элементы режима резания выбраны исходя из рекомендованных для авиационной промышленности [20] (см. таблицу 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных результатов обнаружены регрессионные зависимости для расчета остаточных напряжений при обработке заготовок из титанового сплава ВТ6. Удельный вес влияния каждого элемента режима резания оценивали путем сравнения коэффициентов уравнения регрессии, полученного путем построения кодированной матрицы планирования эксперимента 2^3 , где x_1 – скорость резания V , м/мин; x_2 – подача S , мм/мин; x_3 – глубина резания t , мм. Уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k,$$

где b_0 – коэффициент, соответствующий опыту с поддержанием всех варьируемых факторов на средних уровнях.

Коэффициенты b_j определяли по формуле

$$b_j = \sum_{i=1}^N \frac{x_j y_i}{N},$$

где N – количество экспериментов; x_j – j -й столбец эксперимента; y_i – i -й результат эксперимента.

Расчет регрессионной зависимости производится с использованием программы Microsoft Excel 2007 на ЭВМ.

Таблица 3. Элементы режима резания и состав опытов при исследовании эффективности обработки заготовок из титановых сплавов*

	Скорость резания V , м/мин	Скорость подачи S , мм/мин	Глубина резания t , мм
1	21/21	74/74	0,5/0,5
2	42/21-	74/74	0,5/1,0
3	42/21-	55/55	0,5/0,5
4	21/21	55/55	0,5/1,0
5	21/-	74/-	1/-
6	42/-	74/-	1/-
7	42/-	55/-	1/-
8	21/-	55/-	1/-

* В числителе приведены значения элементов режима резания для сплава ВТ-6, в знаменателе – для сплава ВТ-22.

Уравнения регрессий в натуральной форме:

для силы P_z : $y = 127,75 - 30,00V + 19,00S + 29,08t - 7,17Vt$;

для силы P_y : $y = 78,04 - 16,54V + 11,54S + 16,63t - 5,46Vt$;

для силы P_x : $y = 35,79 - 8,29V + 5,71S + 8,63t$.

Все элементы режима резания (V , S и t) оказывают влияние на составляющие силы фрезерования.

С увеличением скорости резания V все составляющие силы уменьшаются. При подаче $S=74$ мм/мин и глубине резания $t=0,5$ мм изменение V от 21 до 42 м/мин приводит к снижению сил P_x , P_y и P_z на 35, 29 и 35 % соответственно. При $S=74$ мм/мин и $t=1$ мм аналогичное увеличение V приводит к уменьшению составляющих силы резания P_x , P_y и P_z на 32, 35 и 33 %. С увеличением подачи S и глубины резания t силы резания увеличиваются. В частности, при $V=42$ м/мин и глубине резания $t=0,5$ мм увеличение S от 55 до 74 мм/мин приводит к увеличению сил P_x , P_y и P_z на 58, 40 и 58 %. При той же скорости и глубине резания $t=1$ мм силы P_x , P_y и P_z увеличились на 48, 43 и 43 %. При изменении глубины резания t от 0,5 до 1 мм ($V=42$ м/мин, $S=74$ мм/мин) силы резания выросли на 62, 46, 51 %. При $V=42$ м/мин и $S=55$ мм/мин силы увеличились на 73, 42 и 67 %. Таким образом, при принятом диапазоне варьирования элементами режима резания наибольшее влияние на силовую напряженность процесса оказывает глубина резания t , минимальное – скорость резания V .

При наложении на заготовку УЗ-колебаний влияние элементов режима резания на силы фрезерования не изменилось, однако силы уменьшились на 14...20 %. Причиной снижения сил при наложении УЗ-колебаний является главным образом уменьшение сил трения в зоне контакта зубьев фрезы со стружкой и заготовкой.

Уравнения регрессий имеют вид:

для силы P_z : $y = 108,75 - 25,00V + 16,25S + 25,00t - 6,25Vt$;

для силы P_y : $y = 29,00 - 5,75V + 3,25S + 5,75t$;

для силы P_x : $y = 65,25 - 13,5V + 10,25S + 14,00t - 4,75Vt$.

Количество образовавшейся фазы α -Ti определяется температурой и продолжительностью нагрева в зоне резания. Температура, в свою очередь, зависит от мощности источника тепловыделения, которая определяется как произведение главной составляющей силы фрезерования P_z на скорость резания V .

На технологические остаточные напряжения оказывают влияние 2 фактора: температура и $\beta \rightarrow \alpha$ превращения титана (β -титан имеет кубическую объемно центрированную решетку, α -титан – гексагональную плотно упакованную кристаллическую решетку). Из-за особенности кристаллической решетки α -титан имеет больше плоскостей скольжения и двойкования, чем β -титан. В кристаллической решетке α -титана помимо атомов титана расположены элементы внедрения (кислорода и азота). Сопrotивление деформации α -титана при комнатной температуре возрастает с повышением концентрации примесей, особенно кислорода. Отсюда следует, что плоскости скольжения и двойкования будут блокированы атомами включений, а для сдвига или двойкования решетки с включениями (α -Ti) необходимо прилагать большие усилия в направлении сдвига и двойкования. При значительной деформации монокристалла титана, содержащего 0,1 % азота и кислоро-

да, наблюдается повышение предела текучести σ_m . Образование двойников приводит к укорочению кристалла в одном направлении и удлинению в другом, вследствие чего образование двойников и смещений в некоторых плоскостях в зависимости от направления нагрузки может протекать едва заметно или не проявляться. При превышении определенной концентрации деформация становится невозможной. Титановые сплавы с достаточно высоким содержанием β -стабилизирующего элемента содержат β -фазу, которая при комнатной температуре имеет характер деформации объемно центрированной кристаллической решетки β -кристаллов на основе титана, так же как и у железа с объемно центрированной кристаллической решеткой. При одинаковой внешней нагрузке способность к деформации кристаллов с кубической решеткой (β -Ti) выше, чем с гексагональной (α -Ti).

Практически при всех комбинациях элементов режима зафиксированы сжимающие остаточные напряжения, что свидетельствует о доминировании силового фактора над тепловым в процессе обработки.

Растягивающие напряжения получены при скорости резания 42 м/мин: при $t=0,5$ мм и $S=74$ мм/мин $\sigma_m=56$ МПа; при $t=1$ мм и $S=55$ мм/мин $\sigma_m=141,7$ МПа. При этих режимах зафиксированы относительно небольшие силы резания.

Регрессионная зависимость для расчета ТОН:

$$y = -66,08 - 49,58S - 26,42t - 32,83VS - 13,17Vt - 71,75St - 94,83VSt$$

Наложение УЗ колебаний на заготовку приводит к увеличению величины сжимающих напряжений.

При глубине резания $t=0,5$ мм среднее значение остаточных напряжений при фрезеровании без УЗ-колебаний составило -40 МПа; при фрезеровании с УЗ-колебаниями - 198 МПа. При $t=1$ мм наложение УЗ-колебаний привело к изменению сжимающих напряжений от -92 до -223 МПа.

Регрессионная зависимость для расчета ТОН при наложении УЗ-колебаний:

$$y = -210,08 - 29,17S - 12,50t - 3,42VS + 31,75Vt + 9,75St - 40,5VSt$$

Для выявления основных причин возникновения остаточных напряжений в процессе исследований оценивали соотношение фаз α -Ti и β -Ti. Изменение соотношения этих фаз свидетельствует о фазовых превращениях в поверхностном слое, возникающих в процессе обработки, а также может объяснять причины формирования знака технологических остаточных напряжений. Фаза β -Ti является упрочняющей. Увеличение β -Ti фазы указывает на изменение объемно-центрируемой кубической кристаллической решетки (ОЦК), что ведет к увеличению прочностных свойств в поверхностном слое. Фаза α -Ti имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку (ГПУ), наличие этой фазы может привести к разупрочнению в поверхностном слое. Оценка соотношения этих фаз позволяет определить, какие явления происходят в поверхностном

слое обрабатываемых заготовок – упрочнение или же разупрочнение.

Соотношение фазы α -Ti к фазе β -Ti определяется по формуле

$$k = \frac{I_{\alpha-Ti_1} + I_{\alpha-Ti_2}}{I_{\beta-Ti_1} + I_{\beta-Ti_2}},$$

где $I_{\alpha-Ti_1}$, $I_{\beta-Ti_1}$ – интенсивность пиков α - и β -фаз при угле наклона рентгеновской трубки $19,7^\circ$;

$I_{\alpha-Ti_2}$, $I_{\beta-Ti_2}$ – интенсивность пиков α - и β -фаз при угле наклона рентгеновской трубки $27,3^\circ$.

При $V=42$ м/мин, $S=74$ мм/мин с увеличением глубины резания t от 0,5 до 1 мм содержание β -титана понижается с 50,3 до 37,0 %. При таких же режимах, но с наложением УЗ-колебаний количество β -титана уменьшается с 41,7 до 39,4 %. При скорости $V=42$ м/мин, $S=55$ мм/мин увеличение глубины t от 0,5 до 1 мм приводит к снижению содержания β -титана с 36,6 до 32,3 %. С наложением УЗ-колебаний количество β -титана также уменьшается с 45,6 до 28,3 % (рис. 4).

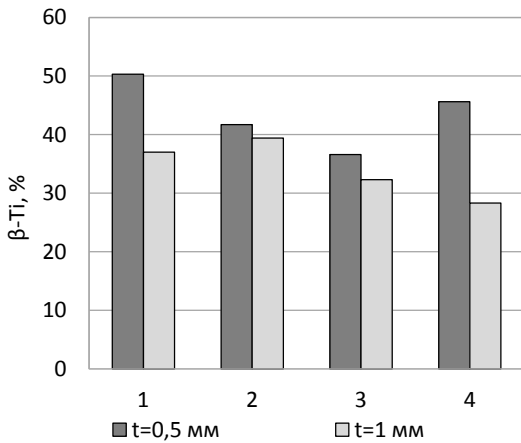


Рис. 4. Диаграмма изменений соотношения фаз при обработке заготовок из ВТ6 на режимах:

- 1 – $V=42$ м/мин, $S=74$ мм/мин без наложения УЗ-колебаний;
- 2 – $V=42$ м/мин, $S=74$ мм/мин с наложением УЗ-колебаний;
- 3 – $V=42$ м/мин, $S=55$ мм/мин без наложения УЗ-колебаний;
- 4 – $V=42$ м/мин, $S=55$ мм/мин с наложением УЗ колебаний

При увеличении глубины t от 0,5 до 1 мм, $V=21$ м/мин, $S=74$ мм/мин содержание β -титана снижается с 33,9 до 27,4 %. При аналогичных режимах, но с наложением УЗ-колебаний количество β -титана понижается с 53,6 до 39,4 %. При скорости $V=21$ м/мин, $S=55$ мм/мин увеличение глубины t от 0,5 до 1 мм приводит к снижению содержания β -титана с 36,6 до 36,5 %. При тех же режимах, но с наложением УЗ-колебаний количество β -титана уменьшается с 45,6 до 30,6 %. Из вышеприведенных данных следует, что при уменьшении глубины фрезерования количество β -титана увеличивается, а наложение УЗ-колебаний значительно повышает содержание β -титана в заготовке (рис. 5).

При $V=42$ м/мин, $t=0,5$ мм и увеличении подачи S от 55 до 74 мм содержание β -титана увеличивается с 36,6 до 50,3 %. С наложением УЗ-колебаний количество β -титана уменьшается с 45,6 до 41,7 %.

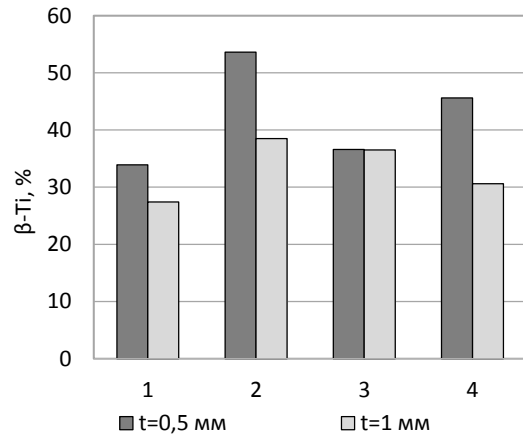


Рис. 5. Диаграмма изменений соотношения фаз при обработке заготовок из ВТ6 на режимах:

- 1 – $V=21$ м/мин, $S=74$ мм/мин без наложения УЗ-колебаний;
- 2 – $V=21$ м/мин, $S=74$ мм/мин с наложением УЗ-колебаний;
- 3 – $V=21$ м/мин, $S=55$ мм/мин без наложения УЗ-колебаний;
- 4 – $V=21$ м/мин, $S=55$ мм/мин с УЗ-колебаниями

При скорости $V=42$ м/мин, $t=1$ мм и увеличении подачи S от 55 до 74 мм/мин содержание β -титана увеличивается с 32,3 до 37,0 %. С наложением УЗ-колебаний и фрезеровании на таких же режимах количество β -титана тоже увеличивается с 28,4 до 39,2 % (рис. 6).

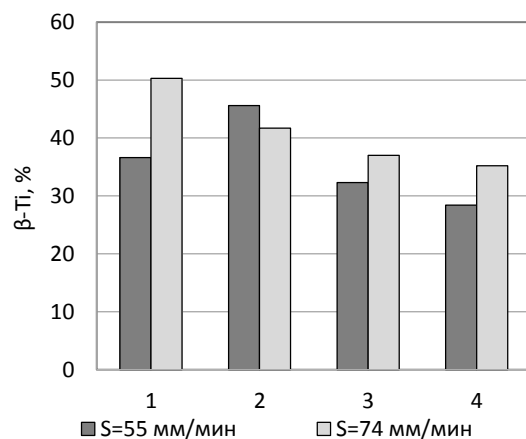


Рис. 6. Диаграмма изменений соотношения фаз при обработке заготовок из ВТ6 на режимах:

- 1 – $V=42$ м/мин, $t=0,5$ мм без наложения УЗ-колебаний;
- 2 – $V=42$ м/мин, $t=0,5$ мм с наложением УЗ-колебаний;
- 3 – $V=42$ м/мин, $t=1$ мм без наложения УЗ-колебаний;
- 4 – $V=42$ м/мин, $t=1$ мм/мин с УЗ-колебаниями

Фрезерование с $V=21$ м/мин, $t=0,5$ мм при изменении подачи S от 55 до 74 мм/мин приводит к повышению содержания β -титана с 33,2 до 33,9 %. На тех же режимах, но с наложением УЗ-колебаний зафиксировано увеличение количества β -титана с 32,3 до 53,6 %. При скорости $V=21$ м/мин, $t=1$ мм с увеличением подачи S от 55 до 74 мм/мин содержание β -титана уменьшается с 36,5 до 27,4 %. При аналогичных режимах с наложением УЗ-колебаний количество β -титана также увеличивается с 30,6 до 38,5 %.

Таким образом, при одинаковых V и t количество β -титана увеличивается с увеличением подачи S . Наложение УЗ-колебаний, независимо от подачи, способствует увеличению содержания β -титана (рис. 7).

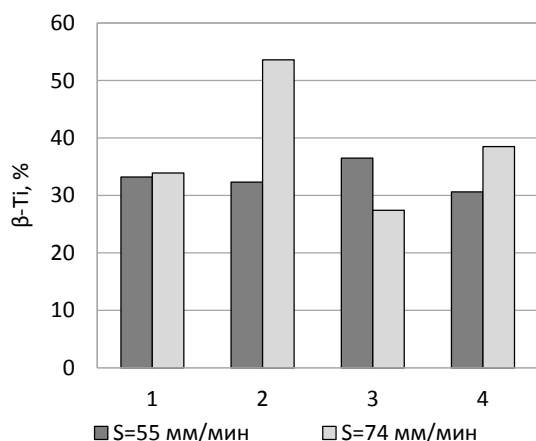


Рис. 7. Диаграмма изменений соотношения фаз при обработке заготовок из ВТ6:

- 1 – $V=21$ м/мин, $t=0,5$ мм без УЗ-колебаний;
- 2 – $V=21$ м/мин, $t=0,5$ мм с УЗ-колебаниями;
- 3 – $V=21$ м/мин, $t=1$ мм без УЗ-колебаний;
- 4 – $V=21$ м/мин, $t=1$ мм с УЗ-колебаниями

Влияние скорости резания V на фазовый состав неоднозначно. При подаче $S=74$ мм/мин и глубине $t=0,5$ мм и изменении скорости резания V от 21 до 42 м/мин содержание β -титана увеличивается с 33,9 до 50,3 %. С наложением УЗ-колебаний и повышением скорости резания содержание β -титана уменьшается с 53,6 до 41,7 %. При подаче $S=55$ мм/мин и глубине $t=0,5$ мм увеличение скорости резания V от 21 до 42 м/мин приводит к увеличению содержания β -титана с 33,2 до 36,6 %. С наложением УЗ-колебаний и повышением скорости резания содержание β -титана увеличивается с 32,2 до 45,6 % (рис. 8). При подаче $S=74$ мм/мин и глубине $t=1$ мм с повышением скорости резания V от 21 до 42 м/мин содержание β -титана увеличивается с 27,4 до 37,0 %. С наложением УЗ-колебаний с повышением V содержание β -титана увеличивается незначительно (с 38,5 до 39,4 %). При подаче $S=55$ мм/мин и глубине $t=1$ мм и изменением скорости резания V с 21 до 42 м/мин содержание β -титана уменьшается с 36,5 до 32,3 %. С наложением УЗ-колебаний и повышением скорости резания содержание β -титана уменьшается с 30,6 до 28,2 %.

Большее влияние на содержание α -Ti оказывают изменение подачи S и глубины t . С увеличением этих элементов режима резания содержание β -Ti увеличивается в среднем на 10 %. Скорость резания в исследуемых пределах влияет в меньшей степени. Наложение УЗ-колебаний на заготовку, как и в ранее рассмотренных случаях, приводит к увеличению содержания β -Ti в среднем на 7,5 %.

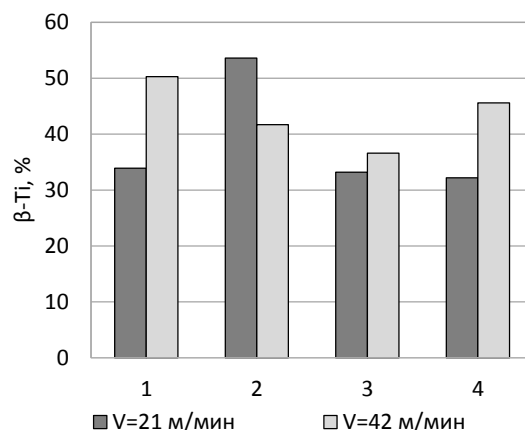


Рис. 8. Диаграмма изменений соотношения фаз при обработке заготовок из ВТ6:

- 1 – $S=55$ мм/мин, $t=0,5$ мм без УЗ-колебаний;
- 2 – $S=55$ мм/мин, $t=0,5$ мм с УЗ-колебаниями;
- 3 – $S=74$ мм/мин, $t=1$ мм без УЗ-колебаний;
- 4 – $S=74$ мм/мин, $t=1$ мм/мин с УЗ-колебаниями

ВЫВОДЫ

Автоматизированное назначение режима фрезерования элементов заготовок нежестких деталей машин с учетом условий жесткости может быть реализовано на практике при эксплуатации современных обрабатывающих центров и станков с ЧПУ. Адекватность методики доказана при сравнении с результатами САЕ-анализа.

Увеличение минутной подачи при фрезеровании заготовок из титанового сплава ВТ6 может привести к улучшению его эксплуатационных свойств (прочности и жаропрочности) за счет увеличения содержания β -титана и сжимающих ТОН. Еще большему росту способствует введение в зону резания УЗ-колебаний.

Исследования выполнены при использовании финансовых средств гранта РФФИ 18-47-730005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 513 с.
2. Киселев 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.
3. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.

4. Bertsche E., Ehmann K., Malukhin K. An analytical model of rotary ultrasonic milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 65. P. 12–17.
5. Zhang Y., Zhao B., Wang Y., Zhao B. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. № 2. P. 1062–1073.
6. Ratchev S., Govender E., Nikov S., Phuah K., Tsiklos G. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143-144. № 1. P. 796–801.
7. Nazarov M.V., Kiselev E.S., Popovich A.V. Using of machine parts abstract elements in nc-programs developing for the CNC machines // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 1–4.
8. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.В. Расчёт пластин. Киев: Будівельник, 1970. 360 с.
9. Грановский Г.И. Резание металлов. М.: Высшая Школа, 1985. 303 с.
10. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 258 с.
11. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 134. № 2. P. 233–253.
12. Campa F.J., de Lacalle L.N.L. Urbikain G., Ruiz D. Definition of Cutting Conditions for Thin-to-Thin Milling of Aerospace Low Rigidity Parts // *MSEC 2008: proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008. Vol. 1. P. 359–368.
13. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Metallurgiya, 1979. 431 с.
14. Qi H.J., Tian Y.L., Zhang D.W. Machining forces prediction for peripheral milling of low-rigidity component with curved geometry // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 64. № 9-12. P. 1599–1610.
15. Svinin V.M., Savilov A.V. Application of variable teeth pitch face mill as chatter suppression method for non-rigid technological system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. № 4. P. 1–7.
16. Antonialli A.I.S., Diniz A.E., Pederiva R. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol. 50. № 1. P. 65–74.
17. Antonialli A.I.S., Diniz A.E. Tool life and cutting forces on semi-finish milling of titanium alloy // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 2010. Vol. 3. № 5-6. P. 329–344.
18. Cox A., Herbert S., Villain-Chastre J., Turner S., Jackson M. The effect of machining and induced surface deformation on the fatigue performance of a high strength metastable β titanium alloy // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 124. P. 26–33.
19. Назаров М.В., Попович Е.С., Киселёв Е.С. Автоматизированный выбор технологии изготовления деталей летательных аппаратов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 8-1. С. 147–153.
20. Moaz H.Ali, Khidhir B.A., Mohamed B., Balasubramanian R., Oshkour A.A. Machining of Titanium Alloys: a review // *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*. 2011. Vol. 1. P. 97–103.

REFERENCES

1. Fedosev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 1999. 513 p.
2. 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.
3. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Intensification of the processes of mechanical treatment using the ultrasonic field energy]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2003. 186 p.
4. Bertsche E., Ehmann K., Malukhin K. An analytical model of rotary ultrasonic milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 65, pp. 12–17.
5. Zhang Y., Zhao B., Wang Y., Zhao B. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling. *Journal of Vibroengineering*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 1062–1073.
6. Ratchev S., Govender E., Nikov S., Phuah K., Tsiklos G. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 143-144, no. 1, pp. 796–801.
7. Nazarov M.V., Kiselev E.S., Popovich A.V. Using of machine parts abstract elements in nc-programs developing for the CNC machines. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, pp. 1–4.
8. Vaynberg D.V., Vaynberg E.V. *Raschet plastin* [Calculation of plates]. Kiev, Budivelnik Publ., 1970. 360 p.
9. Granovskiy G.I. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1985. 303 p.
10. Baranovskiy Yu.V. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting conditions]. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 258 p.
11. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 134, no. 2, pp. 233–253.
12. Campa F.J., de Lacalle L.N.L. Urbikain G., Ruiz D. Definition of Cutting Conditions for Thin-to-Thin Milling of Aerospace Low Rigidity Parts. *MSEC 2008: proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2008, vol. 1, pp. 359–368.
13. Tsvikker U. *Titan i ego splavy* [Titanium and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 431 p.
14. Qi H.J., Tian Y.L., Zhang D.W. Machining forces prediction for peripheral milling of low-rigidity component with curved geometry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 64, no. 9-12, pp. 1599–1610.
15. Svinin V.M., Savilov A.V. Application of variable teeth pitch face mill as chatter suppression method for non-rigid technological system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, no. 4, pp. 1–7.

16. Antonialli A.I.S., Diniz A.E., Pederiva R. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, no. 1, pp. 65–74.
17. Antonialli A.I.S., Diniz A.E. Tool life and cutting forces on semi-finish milling of titanium alloy. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2010, vol. 3, no. 5-6, pp. 329–344.
18. Cox A., Herbert S., Villain-Chastre J., Turner S., Jackson M. The effect of machining and induced surface deformation on the fatigue performance of a high strength metastable β titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 124, pp. 26–33.
19. Nazarov M.V., Popovich E.S., Kiselev E.S. Automated choice of manufacturing techniques of aircraft details. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 8-1, pp. 147–153.
20. Moaz H.Ali, Khidhir B.A., Mohamed B., Balasubramanian R., Oshkour A.A.. Machining of Titanium Alloys: a review. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2011, vol. 1, pp. 97–103.

TO THE ISSUES OF TECHNOLOGICAL PREPARATION AND PROCESSING OF NON-RIGID WORKPIECES MACHINE PARTS

© 2019

E.S. Kiselev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor
M.V. Nazarov, postgraduate student
N.V. Mezin, graduate student
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: non-rigid blank parts processing; cutting modes; VT6, VT22, α -Ti, β -Ti titanium alloys; technological residual stresses; ultrasonic vibrations; phase composition.

Abstract: The authors considered the problems of technological preparation of processing of blank parts of the machine non-rigid elements (FE) and proposed the methodology for specifying the mill modes with regard to the conditions of rigidity implemented through the definition of possible combinations of the cutting mode elements. The factors having the greatest impact on the elastic pressing of the workpiece elements during processing are determined. The authors developed and tested the experimental plant with the thin wall with the height equal to 15 and more of its thicknesses that allows processing the standard blank parts using the ultrasonic field energy in the cutting zone.

The experiments on the processing of VT6 titanium alloy with the subsequent assessment of the level of technological residual stresses (TRS) of a surface layer (PS) of the treated surface, as well as the changes in phase composition (PC) were carried out. The authors assessed the influence of the cutting mode elements on the technological residual stresses and phase composition when applying the ultrasonic field energy to the zone of formation of a surface layer of the non-rigid components surfaces and introduced the regression dependences for calculation of the cutting force components and the TRS level depending on the cutting mode elements.

The study determined that when developing NC codes of the advanced CNC machines, it is possible to implement the automated specifying of the mill conditions for the blank parts of the machine non-rigid elements considering the conditions of their toughness. The authors proved the efficacy of the technique comparing it with the results of CAE-analysis.

The increase of feed per minute when milling VT6 titanium alloy blank parts causes the improvement of its performance characteristics (heat resistance) by means of the increase of β -titanium content; the applying of ultrasonic vibrations to the cutting zone causes the greater growth.