

УДК 536:621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-7-12-19

Е.С. Киселёв, д.т.н., **М.В. Назаров**, магистр
(Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32)
E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Научноёмкая технология повышения эффективности изготовления нежестких деталей из титановых и алюминиевых сплавов

Приведены результаты исследований возможности повышения эффективности изготовления нежестких деталей из титановых и алюминиевых сплавов путём сокращения затрат на технологическую подготовку производства и использования энергии малоомощного модулированного ультразвукового поля.

Ключевые слова: ультразвук; сила резания; контактная температура; остаточные напряжения; релаксация; дислокация.

E.S. Kiselyov, Dr. Sc. Tech., **M.V. Nazarov**, Master
(Uliyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Str., Uliyanovsk, 432027)

Science intensive technology for effectiveness increase in manufacturing flexible aluminum and titanium alloy parts

The investigation results of effectiveness increase in manufacturing flexible parts made of titanium and aluminum alloys by means of costs decrease for technological pre-production and power use of a low-powered module ultra-sonic field are shown.

Keywords: ultrasound; cutting force; contact temperature; residual stresses; relaxation; dislocation.

Особенностью современного механообрабатывающего производства является необходимость изготовления все увеличивающегося количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей, используемых в различных машинах и механизмах, прежде всего в летательных аппаратах (ЛА) и в высокоскоростном наземном и водном транспорте. Это объясняется, с одной стороны, увеличением скоростей исполнительных движений (а следовательно, стремлением уменьшить инерционные нагрузки), с другой стороны – снятием почти полных прежних ограничений у конструкторов в создании сложных деталей из-за широких потенциальных технологических возможностей 3–5-ти осевых станков и обрабатывающих центров с ЧПУ. Основную часть таких деталей изготавливают из титановых и алюминиевых сплавов.

Одновременно, в условиях применения высокопроизводительного металлорежущего оборудования (обрабатывающие центры) и инструмента (ультра мелкодисперсный твердый сплав, минералокерамика, в сочетании с повышенной жесткостью технологической оснастки) всё чаще возникают ситуации, когда процесс обработки заготовки в мелкосерийном и единичном производстве является менее продолжительным, нежели процесс его технологической подготовки.

Таким образом, ключом к повышению производительности и снижению себестоимости изготовления такой продукции является сокращение затрат на инженерную работу путём использования систем автоматизированного проектирования программ управления (в том числе интеллектуальных) и автоматизации ря-

да процессов, требующих многократного повторения.

Одним из таких процессов является назначение режима обработки для каждого планируемого перехода, при котором инженер-технолог должен подобрать рациональные режимы резания, позволяющие обеспечить параметры качества, заданные чертежом, начиная с допуска обрабатываемого элемента и шероховатости поверхности и заканчивая состоянием поверхностного слоя (ПС).

Сложность данного процесса заключается в отсутствии рекомендаций производителей режущего инструмента (РИ) для изготовления нежестких деталей из труднообрабатываемых (титановых, жаропрочных и др.) и отличающихся пониженной температурой плавления и существенно меньшей прочностью в сочетании с хорошей обрабатываемостью, алюминиевых сплавов.

Изготовление нежестких деталей из таких материалов сопряжено с опасностью возникновения в поверхностном слое технологических остаточных напряжений (ТОН), величина которых обычно достаточна для объемного коробления и пространственного изменения взаимного положения обработанных поверхностей в процессе их временной релаксации. В первом случае это объясняется малой теплопроводностью (у титановых сплавов в 4–5 раз меньшей, чем у сталей), во втором – близостью значений контактных температур в зоне резания к температуре плавления алюминиевых сплавов.

Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств при изготовлении нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов стоит существенно острее, чем для других конструкционных материалов. Это объясняется тем, что вся теплота, возникающая в зоне резания, локализуется в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. К тому же объем тонкостенных нежестких деталей, в котором распределяется образовавшаяся теплота, существенно меньше, чем у массивных деталей. На практике это выливается в необходимость уменьшения режимов резания. В некоторых случаях необходимо осуществлять подборку режимов опытным путем для изготовления каждой отдельной конструкции нежестких деталей.

Механическую обработку заготовок деталей, обладающих сложной пространственной формой, чаще всего ведут на современных обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы.

Существующая тенденция к снижению материалоемкости выпускаемых изделий, возрастающие потребности промышленности в

упругих элементах различных устройств обусловили одновременно непрерывный рост объема производства нежестких корпусных деталей высокой точности.

Помимо нежестких деталей, которые деформируются после изготовления до такой степени, что в свободном состоянии выходят за пределы допусков размеров и (или) формы и расположения, относящихся к детали в закрепленном состоянии, существуют так же жесткие детали, не попадающие под определение ГОСТ 30987-2003. Они мало изменяют свою форму после обработки, но состоят из большого количества сложно сочетаемых нежестких элементов. Обработка таких элементов по отдельности вызывает определенные затруднения, а в сочетании с подобными по жесткости элементами делают обработку деталей, в соответствии с требованиями чертежа, весьма трудоёмкой.

Одной из особенностей современного этапа развития технологии машиностроения является резкое повышение производительности механической обработки заготовок за счёт увеличения скоростей формообразования и почти пропорционального уменьшения сечений среза при управлении современными обрабатывающими центрами высоконадёжными системами ЧПУ.

Для этого, как правило, необходима коренная реконструкция машиностроительного производства с заменой основной части парка металлообрабатывающего оборудования. В то же время, из-за наличия в отечественной промышленности большого количества устаревших металлорежущих станков, наблюдается и противоположная тенденция, заключающаяся в увеличении сечения срезаемого слоя и применения рациональных, относительно невысоких скоростей резания. В обоих случаях, дальнейшая интенсификация процессов обработки резанием может быть осуществлена путем внешних энергетических воздействий на объекты контактного взаимодействия в зоне резания для облегчения процесса формообразования новых поверхностей и использования научноёмких технологий [1].

Из большого числа видов, форм и схем энергетических воздействий на процесс обработки резанием наиболее простым и экономичным является применение энергии ультразвукового (УЗ) поля [2]. Характерной особенностью современного состояния физики и техники ультразвука является многообразие его применений, охватывающих частотный диапазон от слышимого порога до частот в несколько мегагерц и область мощностей от долей милливатт до десятков киловатт с использованием при механической обработке

модуляции колебаний по амплитуде, частоте и фазе [3 – 5].

Малая длина УЗ волн обуславливает лучевой характер их распространения, в связи с чем при металлообработке перспективно фокусирование УЗ волн посредством акустических линз, рефлекторов и излучателей вогнутой формы. Это позволяет концентрировать звуковую энергию, получая высокие значения интенсивности звука на поверхностях контактного взаимодействия, которую с помощью традиционных излучателей колебаний получить невозможно. Современные фокусирующие системы позволяют так же формировать заданные характеристики направленности УЗ колебаний и управлять ими.

Ранее, после многочисленных исследований, выполненных в различных странах, возможность реализации размерной механической обработки с УЗК ограничивалось необходимостью создания специальных приспособлений, установок для наложения энергии ультразвукового поля на заготовку (инструмент, СОЖ, детали станка и технологической оснастки и др.) [3 – 6].

В настоящее время компанией DMG MORI разработана и серийно выпускается линейка из 18-ти моделей станков серии ULTRASONIC, в которой в конструкцию шпиндельного узла встроено устройство наложения УЗК на режущий инструмент. Подобными по конструктивному исполнению являются и станки AXILE Machining. Одновременно, серийно выпускаются ультразвуковые оправки (компании Altrasonic, CRENO Industry, Pulchertool), применение которых допустимо на обрабатываемых центрах с ЧПУ оснащёнными шпинделями с конусом ISO40 (SK40, BT40) [7].

Из основных эффектов и путей использования энергии УЗ поля при механической обработке наиболее значимыми являются:

- эффект снижения трения и увеличение пластичности контртел как при параллельном, так и при нормальном направлении колебательных смещений относительно граничных поверхностей;

- кавитация: возникновение в СОЖ массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью;

- УЗ релаксация технологических остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных заготовок.

Последнее, как это следует из дислокационных представлений теории обработки металлических заготовок, объясняется тем, что при воздействии ультразвука на металл, энергия УЗ волны поглощается дислокациями и преобразуется в энергию перемещения этих

дислокаций, вызывая развитие внутризерновых деформаций, способствующих пластическим сдвигам, которые и уменьшают остаточные напряжения.

Как следует из результатов исследований, выполненных в Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ), все они весьма чувствительны к модуляции УЗ колебаний по амплитуде и частоте [5].

Перспективным направлением в решении комплекса вопросов по обеспечению точности фрезерной обработки заготовок нежестких деталей является также совершенствование моделей расчета составляющих силы резания и построение на их основе четко структурированных алгоритмов расчета прогиба таких деталей в процессе их изготовления.

Разработка адекватных математических моделей и автоматизированный расчет элементов режима фрезерования с учетом введения в зону обработки энергии УЗ поля, обеспечивающих заданные параметры нежестких деталей, позволит использовать в максимальной степени потенциальные возможности повышения производительности современных многоцелевых обрабатывающих центров.

Алгоритм автоматизированного назначения режима фрезерования, представленный на рис.1, позволяет решить вопрос поиска рациональных элементов режима резания как с использованием опыта групп пользователей (сотрудники цеха/предприятия/отрасли), так и путем расчёта, исходя из технических требований, заданных чертежом.

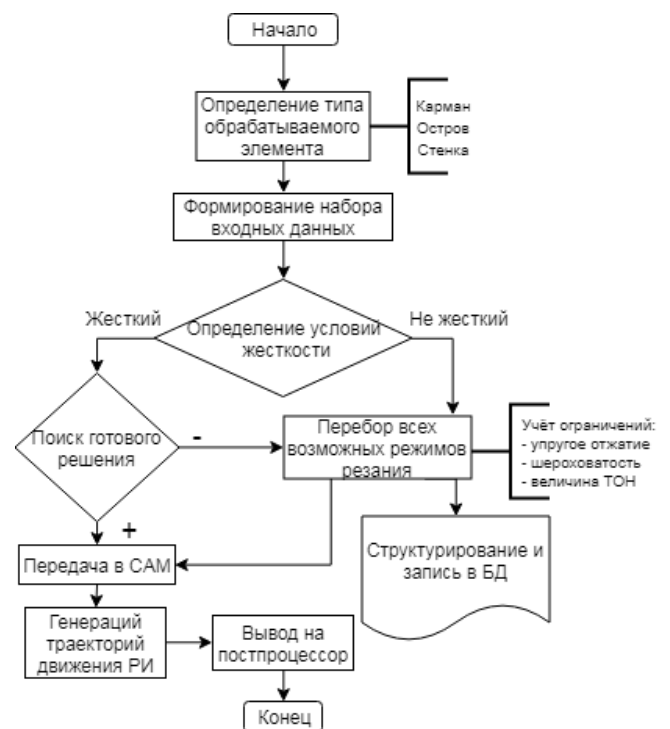


Рис. 1. Укрупнённый алгоритм поиска рационального режима резания

Идентификацию типа обрабатываемого элемента из наиболее распространенных (рис. 2), необходимую как в процессе проектирования операции его обработки, так и в ходе сбора и аккумуляции опыта групп пользователей, предложено определять по алгоритму, представленному на рис. 3.

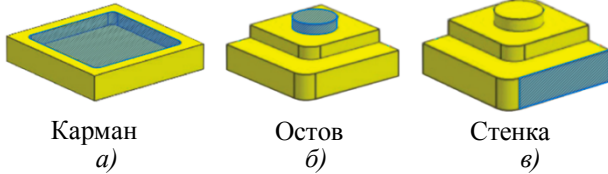


Рис. 2. Типы обрабатываемых элементов

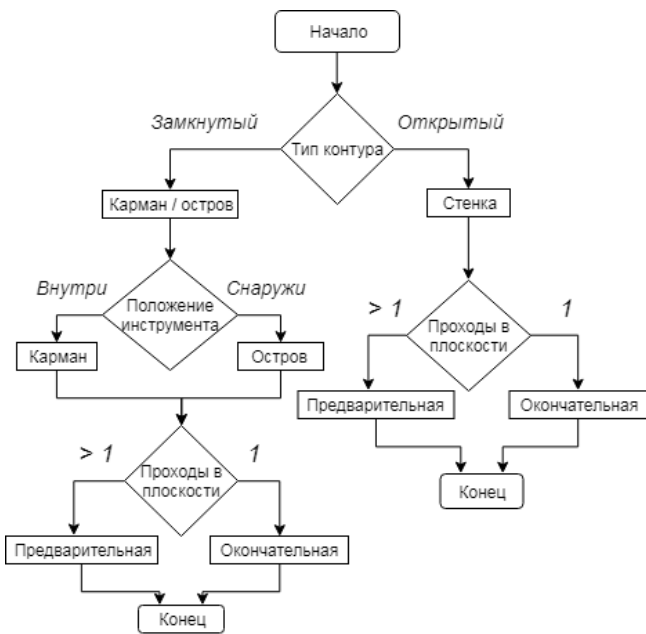


Рис. 3. Алгоритм распознавания типа обрабатываемого элемента

Формирование базы данных (БД), состоящей из набора входных (геометрических параметров обрабатываемого элемента, применяемого РИ, материала заготовки) и выходных (режим резания, метод врезания, параметры качества обработанной поверхности) параметров позволяет использовать опыт пользователей при создании новых технологий изготовления деталей машин. Это позволяет существенно сокращать временные затраты на технологическую подготовку производства (ТПП), а также устранить вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором (рис. 4).

Для реализации алгоритма автоматизации определяли, относится ли обрабатываемый

элемент к жестким или обладает значительной податливостью, являющейся препятствием для его механической обработки (рис. 5). Отдельно стоящую вертикальную стенку представили в виде пластины прямоугольного сечения с длиной wl , толщиной S и высотой l (рис. 6).

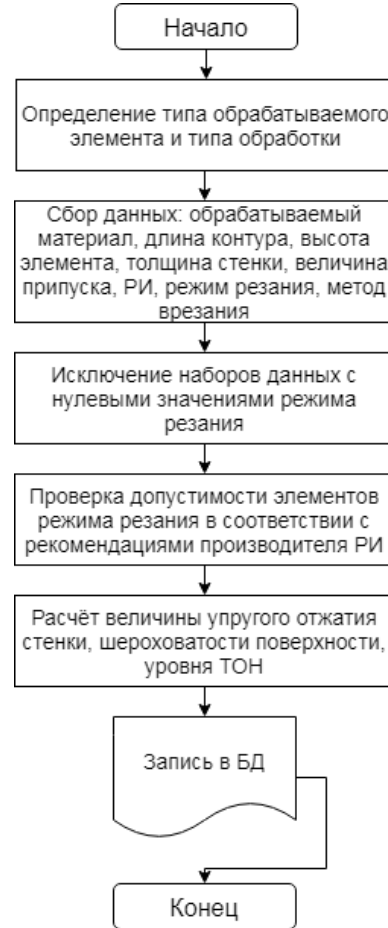


Рис. 4. Методика аккумуляции опыта групп пользователей

В процессе механической обработки точка приложения силы P_y перемещается по линии, перпендикулярной оси инструмента, что объясняется геометрией РИ, а именно спиралевидной режущей кромкой. Точка перемещается по линии в диапазоне от 0 до T (глубина фрезерования), где 0 соответствует верхней точке контакта инструмента с заготовкой, а T – нижней точке. В расчётах рассматривается верхняя точка приложения силы, наиболее удалённая от основания стенки, величина возможного упругого отжатия которой наибольшая.

Расчёт отжатия производили по следующей формуле:

$$w(x, y) = \frac{2P_y}{Dwl} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left(\sinh\left(\frac{\pi n}{wl} x\right) - \frac{\pi n}{wl} x \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} x\right) \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\pi n}{wl} \frac{(1 + \mu) \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} l \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)}{2 \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} l \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)} \times x \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} x\right) \times \cos\left(\frac{\pi n}{wl} (y - y_0)\right) \div \left(\left(\frac{\pi n}{wl}\right)^3 \times \right. \\
 & \quad \times \left(-2 \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} x_0\right) - \frac{\pi n}{wl} x_0 \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} x_0\right)\right) + 3 \frac{(1 + \mu) \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)}{2 \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} l \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)} \times \\
 & \quad \left. \times \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} x_0\right) + \frac{\pi n}{wl} \frac{(1 + \mu) \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)}{2 \cosh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right) + (1 - \mu) \frac{\pi n}{wl} l \sinh\left(\frac{\pi n}{wl} l\right)} x \cos\left(\frac{\pi n}{wl} x\right) \right) \left. \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; l – высота стенки, мм; wl – длина стенки, мм; D – цилиндрическая жесткость стенки Н·мм; n – число шагов сетки.

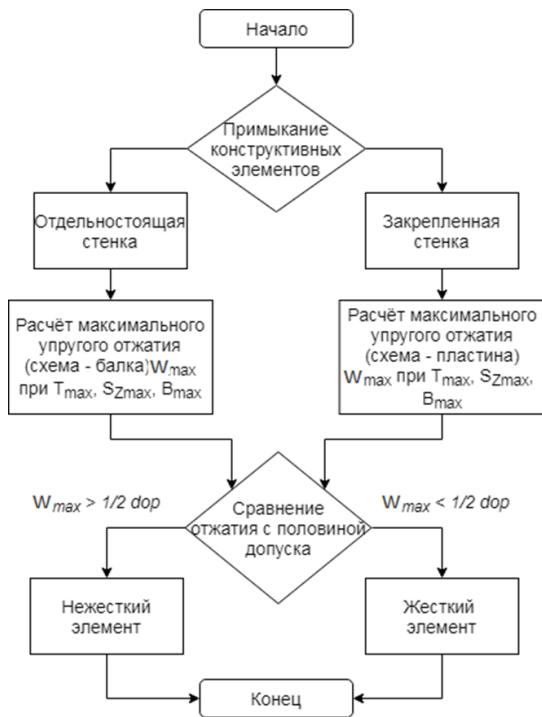


Рис. 5. Алгоритм выявления нежестких элементов

Существуют также детали, в которых нежесткие стенки примыкают к другим конструктивным элементам (рис. 7). В этом случае стенку можно представить в виде пластины, закреплённой с трёх сторон (рис. 8). Расчёт максимального упругого отжатия стенки в представленном случае осуществляли по следующей зависимости:

$$w = k_w \frac{P_y \times l^2}{\pi D}, \quad (2)$$

где k_w – коэффициент, для середины стенки равный 0,527; P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; l – высота стенки, мм;

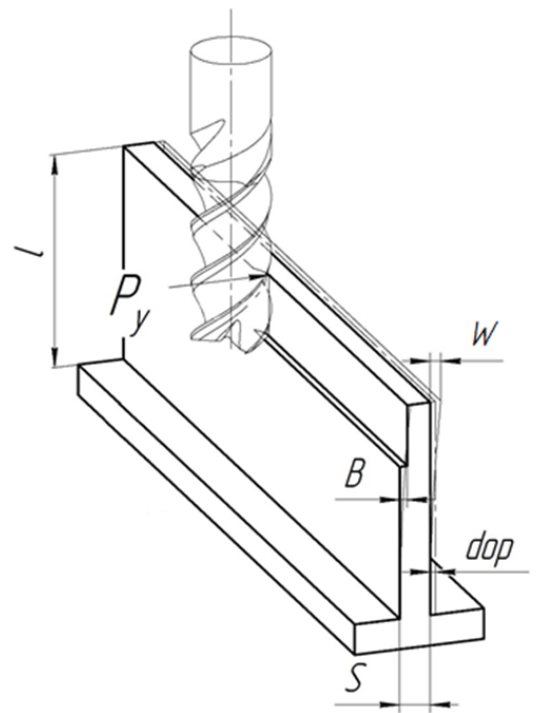


Рис. 6. Стенка пластины, защемленная в основании

D – цилиндрическая жесткость стенки, кг·см.

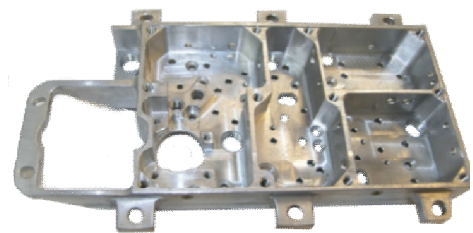


Рис. 7. Деталь, состоящая из ряда примыкающих друг к другу нежестких элементов

Для проверки работоспособности вышеперечисленных методов произведены соответ-

вующие расчёты. Используя значение P_y , полученное в результате расчета по известным зависимостям или в результате замера с помощью универсального динамометра УДМ-100, рассчитали величину максимального упругого отжатия для стенки, представленной в виде балки в пакете инженерного анализа NX CAE и аналитическим методом.

Сравнение результатов первого и второго методов расчёта, а именно CAE расчёта и аналитического расчёта прямоугольной балки, показало, что они взаимозаменяемы. При этом разница в расчётах не превышает 7%. Однако в следствие того, что CAE расчёт является более трудоёмким, в качестве основного способа принят аналитический расчёт отклонения

стенки в виде прямоугольной балки. В то же время, CAE расчёт применим для проверки результатов аналитических расчётов.

Для проверки результатов расчёта максимального упругого отжатия стенки, представленной в виде пластины, создана модель стенки с прилегающими к ней с трёх сторон конструктивными элементами. После расчёта в Siemens NX CAE получили поле рассеяния результатов вычисления (см. рис. 8). Разница между аналитическим и CAE расчётами составила 4%. В дальнейшем основным был принят аналитический метод расчётов. CAE анализ использован для проверочных расчётов.

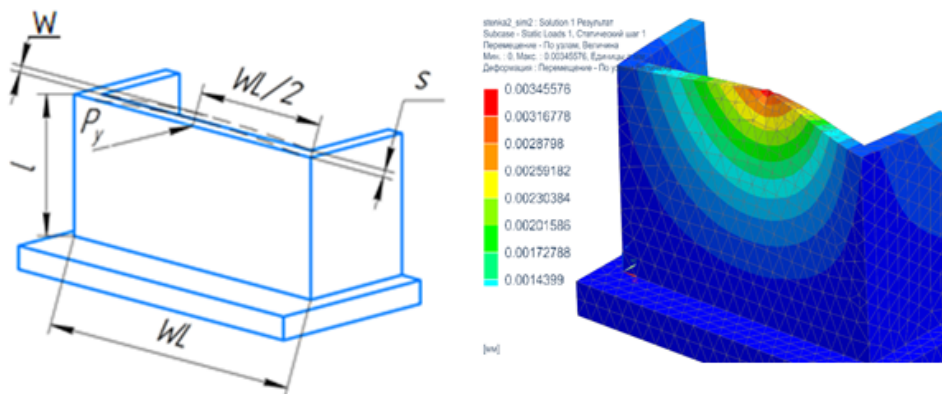


Рис. 8. Стенка в виде пластины

Для определения рациональных режимов резания необходимо определить ряд ограничений: максимальную частоту вращения шпинделя, максимально допустимое упругое отжатие обрабатываемого элемента, максимальную производительность.

Максимальная частота вращения шпинделя накладывает ограничения на допустимую скорость резания. Предлагаемые существующими нормативами значения (в основном, для заготовок из алюминиевых сплавов) зачастую недостижимы из-за технических возможностей основной части используемого на производстве оборудования и малых диаметров РИ, используемых для формирования радиусов перехода.

Ограничивающим условием является и максимально допустимое упругое отжатие стенки:

$$w_{\max} = \frac{dop}{2} \cdot 0,8, \text{ мм} \quad (3)$$

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

Основным фактором, определяющим применение того или иного набора элементов режима резания, является производительность

Q , мм³/мин (величина съёма материала в минуту):

$$Q = \frac{T \cdot B \cdot S_z \cdot n \cdot N_z}{1000}, \quad (4)$$

где N_z – число зубьев фрезы; T – глубина фрезерования, мм; B – ширина фрезерования, мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб; n – частота вращения РИ, об/мин;

Автоматизация поиска рационального режима резания осуществляется в несколько этапов. На первом этапе формируют таблицу исходных данных, включающую рекомендованные производителем элементы режимов резания, технологические параметры инструмента, геометрические характеристики и материал обрабатываемого элемента. На втором этапе осуществляют расчёт возможных сочетаний элементов резания, и формируют таблицу выходных данных. На третьем этапе осуществляют поиск рационального режима резания в зависимости от набора ограничивающих условий.

Поиск рационального режима резания осуществляли методом перебора, рассчитывали значения упругого отжатия (лимитирующим может быть задан любой параметр качества) и величину съёма материала в минуту.

Варьируемые параметры: ширина фрезеро-

вания B подача на зуб S_z . Диапазон варьирования определяется каталогами производителей РИ, в которых представлены максимальные и минимальные значения изменяемых параметров. Шаг варьирования для каждого параметра остаётся неизменным: для ширины фрезерования $B - 0,05$ мм; для глубины фрезерования $T - 0,1$ мм; для подачи на зуб $S_z - 0,002$ мм/зуб. Величина шага определена опытным путём.

Количество наборов параметров режима резания определяли следующим образом:

$$Nn = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{0,05} \cdot \frac{T_{\max} - T_{\min}}{0,1} \cdot \frac{S_{z\max} - S_{z\min}}{0,002} \quad (5)$$

Алгоритм перебора параметров режима резания представлен на рис. 9.

Среди оставшихся наборов параметров режима резания осуществляли поиск наиболее производительного, величина Q которого максимальна. Полученный набор передавали в САМ систему. Перспективным решением проблем уменьшения теплосилового напряжения процесса обработки, от которой зависит величина P_y и оказывающая наибольшее влияние на упругое отжатие обрабатываемого элемента, является применение комбинированных технологий, реализуемых путем управляемого дополнительного воздействия на инструмент и/или технологическую среду концентрированных потоков дополнительной энергии, в том числе механических колебаний УЗ частоты.

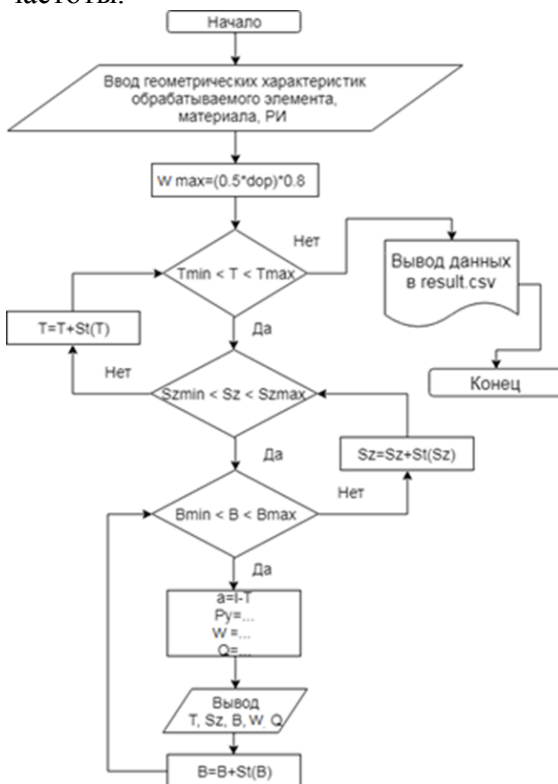


Рис. 9. Алгоритм перебора параметров режима резания

Проверку эффективности введения энергии

УЗ поля в зону формообразования нежестких тонкостенных заготовок на силы резания и структурно-фазовые превращения, осуществляли при фрезеровании модельных заготовок из титановых и алюминиевых сплавов.

Для экспериментальных исследований влияния УЗ колебаний на параметры качества обработанных поверхностей использовалась установка, представленная на рис. 10. При обработке варьировали глубиной фрезерования, подачей на зуб, скоростью резания.

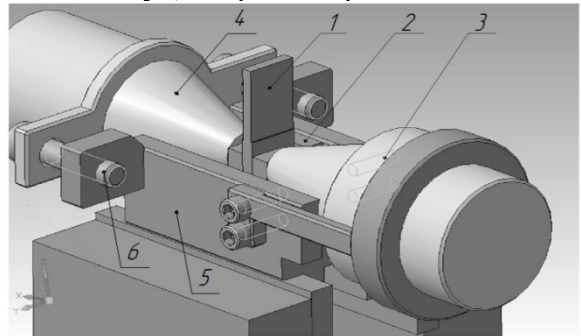


Рис. 10. Схема УЗ-установки:

- 1 – отражатель; 2 – упор; 3 – отражатель;
- 4 – УЗ-излучатель; 5 – кронштейн; 6 – винты

После обработки заготовок ($50 \times 30 \times 5(2.5)$) из алюминиевого сплава Д16Т со съемом двухстороннего припуска оценивали следующее: уровень ТОН в ПС – измерительным комплексом «Ситон-АРМ»; фазовый состав ПС – рентгеновским методом с помощью прибора «РИКОР-7». В качестве РИ выбрана твердосплавная монолитная фреза для работы с цветными сплавами Халтек МА2NNN 100 072 000 диаметром 10 мм.

Определяли диапазон варьирования каждого параметра: глубина фрезерования $0,1 < T < 15$ мм; ширина фрезерования $0,05 < B < 5$ мм; подача на зуб $0,01 < S_z < 0,12$ мм/зуб. Скорость резания принимали постоянной $v = 630$ м/мин, исходя из возможностей используемого оборудования (обрабатывающий центр DMU 50 ecoline). В процессе исследований определяли параметры, являющиеся входными для использования в разработанной программе: высота стенки l , цилиндрическая жесткость стенки D , частота вращения шпинделя n . Обработка осуществлялась с подачей поливом 10%-ной водной полусинтетической СОЖ Cimstar 620. После обработки тонкостенной заготовки осуществляли измерение положения обработанной поверхности, используя контактный датчик с оптической передачей сигнала Renishaw OMP40.

При экспериментах был определен диапазон соотношений толщины к высоте стенок, в котором предложенный метод расчёта величины упругих отжатий работоспособен. Фрезеровали стенки различной толщины при оди-

наковом режиме резания. После обработки определяли реальное положение обработанной поверхности относительно прогнозируемого (табл. 1).

Анализируя полученные данные, можно прийти к выводу, что разработанная математическая модель верна в диапазоне соотношений толщины и высоты стенки от 1:3,3 до 1:30. Реальное отклонение положения обработанной поверхности попадает в пределы, рассчитанные при помощи предложенной зависимости.

1. Реальное положение обработанной поверхности относительно прогнозируемого

Соотношение толщины к высоте	1:3,3	1:4,3	1:5	1:6	1:7,5	1:10	1:15	1:30
Отжатие, мм	0,003	0,005	0,008	0,010	0,018	0,026	0,047	0,151
Расчётное отжатие, мм	0,003	0,005	0,008	0,010	0,018	0,027	0,049	0,154

Экспериментально определенное положение обработанной поверхности расходится с прогнозируемым на 8,6 % в меньшую сторону, обеспечивая попадание в поле допуска.

Наличие в зоне резания энергии УЗ поля при обработке титановых сплавов приводит к стабилизации уровня ТОН при большей производительности и обеспечивает уменьшение поля рассеяния рассматриваемого показателя. Это даёт возможность прогнозирования данного параметра качества на этапе ТПП. При обработке алюминиевых сплавов введение в зону формообразования УЗ колебаний способствует уменьшению растягивающих ТОН на 30...35 %. В обоих случаях наблюдается уменьшение сил резания в 1,4–1,5 раза по сравнению с обработкой без УЗ колебаний.

Выводы

1. Разработан алгоритм автоматизированного поиска рациональных режимов резания расчётным методом и методом адаптации опыта групп пользователей.

2. Представленная в работе математическая модель расчёта величины упругих отжатий обрабатываемого элемента под действием силы резания, как отдельно стоящего, так и соединенного с другими конструктивными элементами, позволила определить вероятность выхода размеров изготавливаемых нежестких деталей за пределы поля допуска.

3. Предложенная методика автоматического назначения элементов режима резания позволила выбирать рациональный режим для фрезерования стенок с соотношением толщины к высоте от 1:3,3 до 1:30 в ходе ТПП, исходя из условий их жесткости, минимизировав время простоя металлорежущего оборудования во время корректировки управляющих программ после предварительной обработки.

4. Выполненные исследования применения ультразвуковых колебаний при изготовлении нежестких деталей позволили выявить возможности снижения сил резания и интенсификации процесса фрезерования, а также возможность прогнозирования параметров качества поверхностного слоя на стадии ТПП.

5. Проведены теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования

ТОН и фазового состава ПС заготовок из алюминиевых и титановых сплавов, получены регрессионные зависимости расчёта величины технологических остаточных напряжений, позволяющие на стадии ТПП осуществлять прогнозирование состояния поверхностного слоя. Максимально достигнутое снижение уровня ТОН в ПС обработанного образца – 26 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Научноёмкие технологии в машиностроении** / под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2012. - 528 с.
2. **Справочник технолога** / под ред. А.Г. Сулова – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
3. **Ватобэ, К.** Вибрационное резание. – М.: Мир, 1982. – 280 с.
4. **Марков, А.И.** Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
5. **Киселёв, Е.С., Ковальнов, В.Н.** Механическая обработка заготовок в условиях критического теплопереноса // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2008. – 250 с.
6. **Киселёв, Е.С.** Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей / Е.С. Киселев, О.В. Благовский. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 140 с.
7. **ULTRASONIC 20 linear.** Flexible integration technologies in DMG machines MORI. ULTRASONIC mobile BLOCK. ULTRASONIC2-th generation [Электронный ресурс]// URL: www.dmgmori.com (дата обращения 10.04.2020).

REFERENCES

1. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering / under the editorship of A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2012. - pp. 528.
2. Technologist's Reference Book / under the editorship of A.G. Suslov. - M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019. pp. 800.
3. **Vatobe, K.** *Vibration Cutting*. – M.: Mir, 1982. – pp. 280.
4. **Markov, A.I.** *Ultrasonic Material Processing*. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 237.
5. **Kiselyov, E.S., Kovalnogov, V.N.** Billet machining under conditions of critical heat and mass transfer // *Selected Proceedings of Russian School on Problems of Science and Technologies*. – M.: RAS, 2008. – pp. 250.
6. **Kiselyov, E.S.** *Control of Residual Stress Formation when Critical Parts Manufacturing* / E.S. Kiselyov, O.V. Blagovsky. – Saint-Petersburg: Lan, 2020. – pp. 140.
7. **ULTRASONIC 20 linear.** Flexible integration technologies in DMG machines MORI. ULTRASONIC mobile BLOCK. ULTRASONIC2-th generation [Electronic resource] // URL: www.dmgmori.com (Address date: 10.04.2020).

Рецензент д.т.н. Н.Н. Воронин