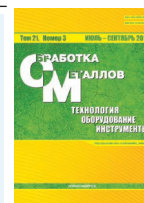




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок

Петр Еремейкин^{1, а, *}, Аягма Жаргалова^{2, б}, Сергей Гаврюшин^{1, 2, в}

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва, 101990, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>,  eremeykin@gmail.com, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>,  azhargalova@bmstu.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>,  gss@bmstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 14 июня 2019

Рецензирование: 15 июля 2019

Принята к печати: 15 августа 2019

Доступно онлайн: 15 сентября 2019

Ключевые слова:

Моделирование

Фрезерование

Метод конечных элементов

Технологические деформации

Тонкостенная заготовка

Режимы резания

АННОТАЦИЯ

Введение. Технологи часто сталкиваются с трудностями при разработке процессов фрезерования тонкостенных изделий. При обработке нежестких деталей под действием сил резания происходит деформация заготовки, что приводит к неравномерному снятию материала и отклонению геометрии получаемой поверхности от расчетной. Существует ряд технологических приемов, позволяющих добиться требуемых параметров качества, но они, как правило, связаны с применением дополнительного оборудования, приспособлений или материалов, что неизбежно ведет к увеличению стоимости обработки. **Цель работы** заключается в развитии и обобщении нового подхода к обработке тонкостенных деталей применительно к фрезерованию. Этот подход называется «мягкие» режимы обработки и состоит он в том, чтобы с помощью численного моделирования для конкретных технологических условий подобрать рациональные параметры процесса резания. Подобранные таким образом режимы должны обеспечивать достижение заданных качеств изделия и при этом быть экономически обоснованными. Чтобы упростить процесс выбора, ранее была разработана автоматизированная система, позволяющая технологу учесть деформации при точении полых цилиндрических заготовок. Эта же система может быть использована как инструмент назначения режимов резания для случая фрезерной обработки, но для этого необходимо разработать модель деформации детали под действием сил резания. **В работе рассматривается** случай попутного фрезерования тонкостенного ребра цилиндрической фрезой. **Методы исследования:** в системе Abaqus разработана численная МКЭ-модель обработки заготовки с учетом ее податливости. **Результаты и обсуждение.** Результаты моделирования представлены в виде изображения трехмерных моделей с указанием деформаций заготовки, в виде графика силы резания в зависимости от времени обработки и в виде цветовой диаграммы результирующей толщины стенки детали. Анализ результатов позволяет сделать вывод о существенном вкладе податливости заготовки в качество поверхности, а также об актуальности применения численных моделей для предсказания точности обработки ввиду сложности и неравномерности получаемых искажений.

Для цитирования: 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.

Введение

Машиностроение играет важную роль в любой высокотехнологичной экономике. Эта отрасль во многом определяет обороноспособность страны, инвестиционный климат и внешнеэкономический потенциал, а ее разви-

тие является стимулом для укрепления других направлений промышленности. В целях повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения большие усилия направлены на организацию производства, освоение новых технологий и внедрение цифровой экономики.

Фрезерование получило широкое распространение в машиностроении благодаря применимости для обработки сложных поверхностей заготовок из различных материалов и возможности обеспечения высокого качества поверхности [1]. Фрезерной обработке посвящено большое

*Адрес для переписки

Еремейкин Петр Александрович, аспирант

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Малый Харитоньевский переулок, д. 4,

101990, г. Москва, Россия

Тел.: +7 (916) 662-57-38, e-mail: eremeykin@gmail.com

количество фундаментальных исследований. В области теории и практики применения этой технологической операции накоплен значительный объем знаний [2, 3], который позволяет задействовать фрезерование во всех отраслях машиностроения. Тем не менее этот метод обработки имеет ограничения и его использование в условиях низкой жесткости изделия вызывает трудности. Такие изделия часто находят применение в авиационной, космической, энергетической и автомобильной промышленности.

Проблема фрезерования нежестких деталей заключается в возникновении технологической деформации заготовки, вызванной воздействием инструмента на заготовку [4]. На рис. 1 изображена схема обработки, иллюстрирующая эту проблему. В случае жесткой заготовки ее отклонение от исходного состояния не вносит значительного вклада в точность получаемой поверхности. Для податливой заготовки ситуация противоположная: существенное отклонение заготовки вызывает неравномерное срезание материала, что приводит к погрешности формы [5–7]. Таким образом, если конструктивные требования податливого изделия задают узкий допуск на погрешность формы поверхности, обрабатываемой фрезерованием, технологу необходимо учитывать жесткость заготовки или применять альтернативные способы формообразования, например аддитивные технологии [8].

В настоящее время разработка технологического процесса фрезерной обработки тонкостенных деталей требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае и зависит от геометрической конфигурации изделия, материала заготовки, технологических возможностей производства, а также требований к точности, качеству поверхности и экономических ограничений.

Один из подходов к решению проблемы технологического деформирования состоит в выборе подходящей стратегии удаления материала [9]. Например, согласно эмпирическому правилу «8 к 1» для изготовления тонкостенных ребер рекомендуется срезать материал последовательно, чередуя обрабатываемые стороны заготовки, при каждом проходе осевая глубина резания не должна превышать конечную толщину стенки более чем в восемь раз [10]. Применение этого правила обеспечивает поддержку более тонкой части заготовки более толстой.

Назначение инструмента также играет важную роль при разработке технологического процесса фрезерования податливых изделий [11]. Рациональный выбор главного угла в плане позволяет задавать направление силы резания, благодаря чему можно добиться приложения основной составляющей силы резания вдоль наиболее жесткого направления заготовки. Кроме того, при разработке технологических процессов тех-

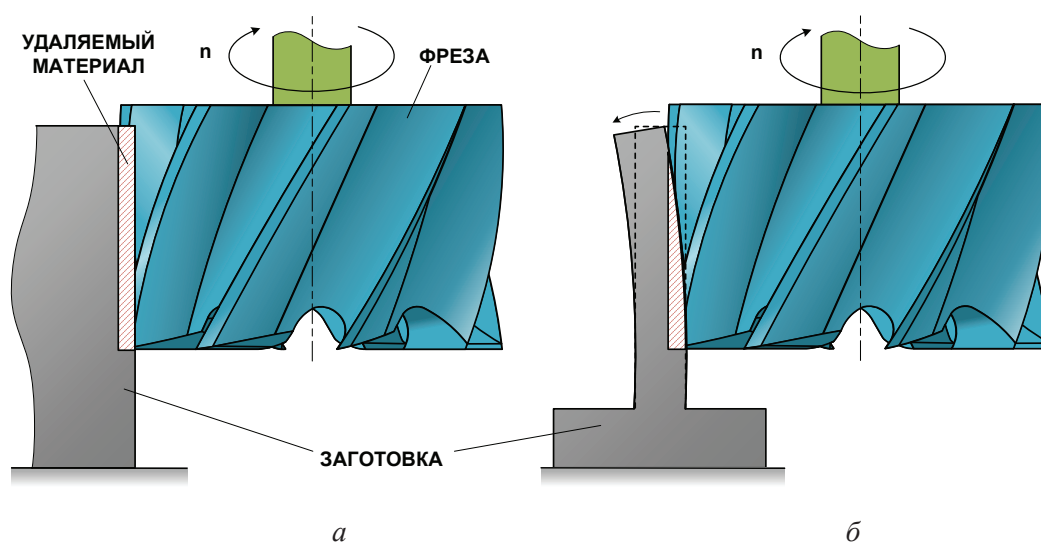


Рис. 1. Схема фрезерования:
а – жесткая заготовка; б – податливая заготовка

Fig. 1. Milling scheme:
а – rigid workpiece; б – nonrigid workpiece

нологи уделяют большое внимание числу зубьев фрезы, так как от этого параметра зависят другие характеристики процесса, в том числе и сила резания. Как правило, предпочтение отдают инструменту с большим числом зубьев, руководствуясь в том числе и жесткостью самой фрезы.

Применяются также способы, предлагающие использовать специальную технологическую оснастку и приспособления. На рис. 2 показана схема подвижного крепления для обработки тонкостенных деталей, предложенная авторами работы [12]. Дополнительная подвижная опора препятствует отклонению заготовки, а демпфирующий элемент, встроенный в поддерживающую головку, сокращает роль вибрации, что ведет к улучшению качества поверхности.

Еще один способ уменьшения деформации при обработке состоит в том, чтобы временно повысить жесткость заготовки с помощью технологического заполнителя. Таким заполнителем может служить легкоплавкий металл или термопластический состав. В случаях, когда это позволяет геометрическая конфигурация изделия, материалом в жидком или пластичном состоянии заполняют полость заготовки и создают условия для его затвердевания, после чего производят обработку. Фрезерование заполненной жесткой заготовки сопровождается относительно небольшими деформациями и не вызывает погрешностей формы. После завершения обработки заполнитель размягчают и извлекают из детали.

Рассмотренные способы фрезерования тонкостенных заготовок до настоящего времени находят применение в различных ситуациях и используются на производстве. Однако каждый из них имеет свои ограничения и область применения. Недавно был предложен новый перспективный подход к обработке тонкостенных деталей, названный методом мягких режимов резания [13]. Этот метод состоит в том, чтобы с использованием цифрового моделирования процесса резания выбрать рациональные режимы и условия обработки, которые, с одной стороны, позволят достичь требуемой производительности, а с другой – создадут благоприятные условия фрезерования и позволят контролировать силы резания таким образом, чтобы деформация заготовки не превышала установленных пределов.

Для промышленного применения метода мягких режимов резания требуется разработка программного обеспечения, которое предоставит технологу интерфейс для управления технологическими параметрами и ограничениями, моделирования процесса и анализа результатов. Описание разработки такой системы приведено в статье [14]. В основе ее работы лежит численное МКЭ-моделирование в прикладном программном комплексе Abaqus. В статье [15] показано, что система готова к промышленному использованию для случаев точения цилиндрических заготовок, но не имеет функционала для моделирования фрезерной обработки. Однако благодаря открытой модульной архитектуре

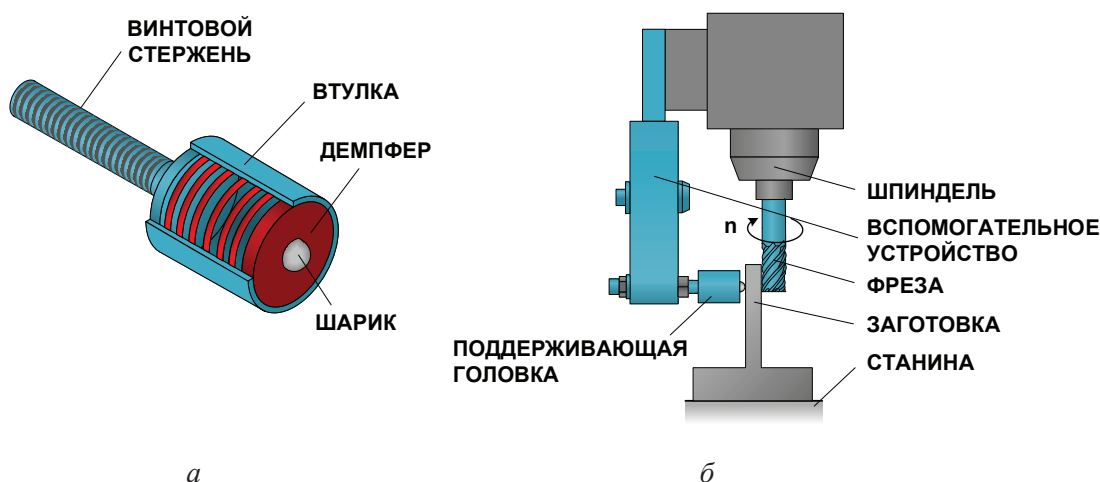


Рис. 2. Схема подвижного крепления для обработки тонкостенных деталей:

a – поддерживающая головка; *б* – конструкция крепления

Fig. 2. Moving fixture for thin-walled workpiece processing:

a – supporting head; *б* – mounting design

такой функционал можно добавить в систему при условии наличия численной модели.

В настоящей работе приводится описание параметризованной МКЭ-модели фрезерования тонкого ребра. Модель имеет не только исследовательскую ценность, но и прикладную, так как ее можно использовать для расширения функционала упомянутой системы и промышленного применения при расчете мягких режимов фрезерования.

Методика исследований

Для исследования процесса обработки нежесткой детали выбран типичный случай попутного фрезерования тонкого ребра цилиндрической фрезой. С одной стороны, заготовка имеет примитивную конфигурацию, таким образом, рассмотрение происходящих явлений на примере такой заготовки упрощено, с другой – тонкостенные ребра часто применяются как элемент конструкции более сложных деталей. Например, баки ускорителей космических ракет изготавливаются в виде вафельной конструкции с большим числом продольных и поперечных ребер [16], поэтому решение задачи анализа точности фрезерования в выбранной постановке актуально в том числе и с точки зрения промышленного применения.

Размеры заготовки и фрезы показаны на рис. 3, а. Изначальная толщина стенки составляет 6 мм. Инструмент настроен таким образом, чтобы срезать 3,5 мм от толщины стенки, если бы заготовка была абсолютно жесткой, как показано на рис. 3, б. Осева глубина резания равна 35 мм.

Заготовка неподвижно закреплена по нижней грани, а фреза совершает поступательное движение вдоль оси OZ и вращательное – относительно своей оси. Технологические параметры процесса резания приведены в табл. 1.

При разработке модели был принят ряд допущений, некоторые из них планируется учесть при дальнейшей доработке. Во-первых, в модели не учтены тепловые процессы. Современные прикладные комплексы МКЭ-анализа позволяют учитывать явление выделения тепла при резании материалов. Для этого применяется специальная разновидность конечных элементов, учитывающих температурное распределение. В библиотеке системы Abaqus такие элементы имеют символ T в конце названия. В описываемой модели принято упрощение и применяются стандартные элементы без учета температуры.

Второе упрощение заключается в том, что жесткость станка, приспособления и инструмента не учитываются. Фреза рассматривается как абсолютно жесткое тело. Проблема жестко-

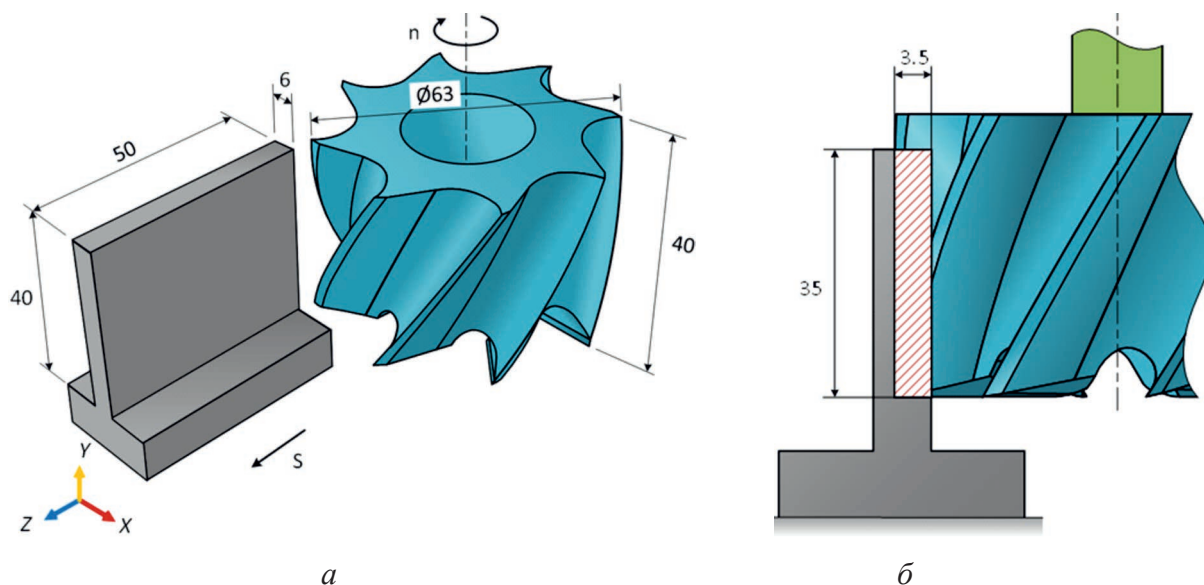


Рис. 3. Геометрические параметры модели:

а – размеры заготовки и фрезы; б – настройка инструмента

Fig. 3. Geometrical parameters:

а – dimensions of the workpiece and milling tools; б – tools setting

Таблица 1 температуры. Как было отмечено выше,

Table 1 одно из принятых упрощений заключается в том, что температурные процессы на данном этапе проработки модели не рассматриваются, поэтому $\hat{\theta} \equiv 0$.

Технологические параметры процесса Technological process parameters

Оборотная подача, $S_{об}$	3,2 мм/об
Число оборотов фрезы, n	290 мин ⁻¹
Номинальная радиальная глубина резания, t	3,5 мм
Осевая глубина резания, t_a	35 мм
Число зубьев фрезы, z	8

сти технологической системы носит общий характер, т. е. проявляется в том числе и при обработке жестких деталей, и требует отдельного исследования. Как правило, при обработке тонкостенных деталей податливостью остальных элементов технологической системы можно пренебречь, так как она существенно меньше податливости заготовки.

В аэрокосмической промышленности, для которой характерно применение тонкостенных деталей, снижение массы изделий имеет первостепенное значение, поэтому наиболее часто применяются легкие сплавы, в частности сплавы на основе алюминия. Исходя из этого, а также из доступности эмпирических данных, описывающих характеристики материалов при разрушении, в качестве материала заготовки выбран сплав Al 6061-T6.

Для учета изотропного упрочнения применена эмпирическая модель Джонсона–Кука [17], согласно которой предел текучести определяется по формуле

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] (1 - \hat{\theta}^m),$$

где $\bar{\epsilon}^{pl}$ – эквивалентная пластическая деформация; A, B, n, m – параметры модели, а $\hat{\theta}$ – безразмерная температура, учитывающая термическое разупрочнение и определяемая выражением

$$\hat{\theta} \equiv \begin{cases} 0, & \text{для } \theta < \theta_{tr}, \\ \frac{\theta - \theta_{tr}}{\theta_m - \theta_{tr}}, & \text{для } \theta_{tr} < \theta < \theta_m, \\ 1, & \text{для } \theta > \theta_m, \end{cases}$$

где θ – текущая температура; θ_m – температура плавления; θ_{tr} – переходная температура, ниже которой нет зависимости предела текучести от

Процесс разрушения также описывается моделью Джонсона–Кука, которая принимает, что деформация при разрушении $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ зависит от эффективной скорости пластической деформации $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl} / \dot{\epsilon}_0$, отношения среднего нормального напряжения к эквивалентному p/q и безразмерной температуры, определенной выше [18]. Эта зависимость выражается формулой

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}),$$

где $d_1 \dots d_5$ – параметры модели.

Физические характеристики материала заготовки, а также значения параметров модели упрочнения и разрушения, взятые из [19], приведены в табл. 2.

Разбиение тел конечно-элементной сеткой показано на рис. 4. Для сложной геометрии фрезы применены тетраэдральные элементы C3D4. Применение тетраэдральных элементов в данном

Таблица 2

Table 2

Характеристики материала заготовки (Al 6061-T6)

Workpiece material properties (Al 6061-T6)

Свойство материала	Значение
Плотность	2700 кг/м ³
Модуль продольной упругости	70 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,33
A	324 МПа
B	114 МПа
n	0,42
d_1	-0,77
d_2	1,45
d_3	-0,47
d_4	0
d_5	1,6

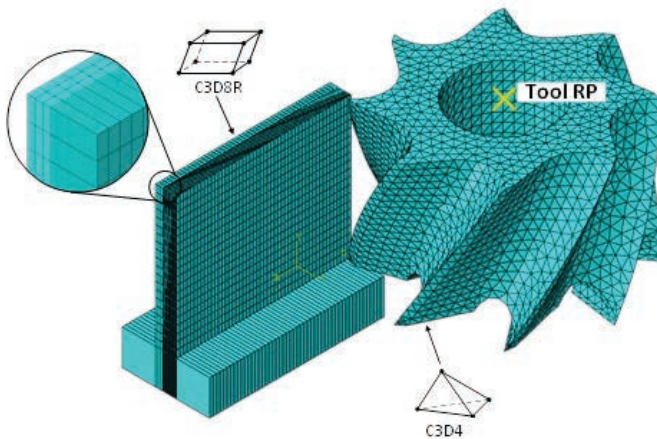


Рис. 4. МКЭ сетка модели
Fig. 4. FEA mesh

случае оправданно, так как жесткость фрезы при моделировании не учитывается и она исключена из анализа. Для разбиения заготовки используется восьмиузловой объемный элемент C3D8R. Разбиение заготовки имеет особенность, показанную на выноске, рис. 4. Для того чтобы обеспечить большую точность моделирования, зона резания разбита на более мелкие элементы.

Граничные условия для тел заданы согласно кинематике процесса: узлы заготовки на нижней грани лишены всех степеней свободы ($U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6 = 0$), а на все узлы инструмента наложено ограничение жесткого тела. В Abaqus ограничение жесткого тела, наложенное на множество узлов, подразумевает, что эти узлы не изменяют своего относительного положения на протяжении всего моделирования и движутся совместно с точкой, называемой контрольной. Заданная контрольная точка для фрезы отмечена на рис. 4 как Tool RP, она лежит на оси фрезы в плоскости ее верхнего торца. Для точки Tool RP заданы линейная скорость, направленная вдоль оси OZ , и угловая скорость вращения относительно оси OY локальной системы координат согласно значениям технологических параметров из табл. 1.

Взаимодействие фрезы и заготовки определено через контакт всех элементов фрезы с элементами заготовки, которые попадают в зону резания. Как было отмечено ранее, эти элементы имеют меньшие размеры. Свойства взаимодействия определены в постановке «жесткого контакта» (бесконечный рост давления при

взаимопроникновении поверхностей) и метода штрафных функций. Коэффициент трения задан равным 0,308.

Анализ результатов

Моделирование процесса фрезерования показало, что податливость заготовки, как и ожидалось, существенно влияет на качество обработки. На рис. 5 показаны поля узловых перемещений заготовки, на которых величина перемещения соответствует цвету. Указанные диаграммы построены только для одной компоненты вектора перемещений – U_1 , которая является проекцией на ось OX . Для простоты восприятия цветовая шкала соответствует абсолютным значениям без учета направления. В направлении OX заготовка имеет наименьшую жесткость, поэтому именно узловые перемещения U_1 вносят основной вклад в погрешность формы.

На рис. 5, а изображены максимальные перемещения конечных элементов ребра в необрабатываемой зоне за все время моделирования. По этой диаграмме можно сделать предположение о неоднородном характере погрешностей и их зависимости от положения рассматриваемой точки как по оси OY , так и вдоль оси подачи OZ .

На рис. 5, б проиллюстрированы перемещения всех элементов заготовки, соответствующие моменту времени 2,73 с от начала моделирования. Как видно из этой диаграммы, наибольшее отклонение возникает в узлах на краю ребра, которое находится ближе всего к инструменту. В целом диаграммы перемещений, полученные по результатам моделирования, подтверждают возникновение проблемы технологических деформаций, на существование которой было указано во введении исходя из производственной практики.

Для дальнейшего развития и применения разработанной модели в автоматизированной системе назначения рациональных режимов резания необходимо иметь возможность получения величины силы резания (рис. 6). Многие современные аналитические методики, позволяющие учитывать податливость заготовки (например подход, приведенный в [1]), исходят из известной силы резания или предлагают определить ее с помощью формул, выраженных с использованием эмпирических коэффициентов

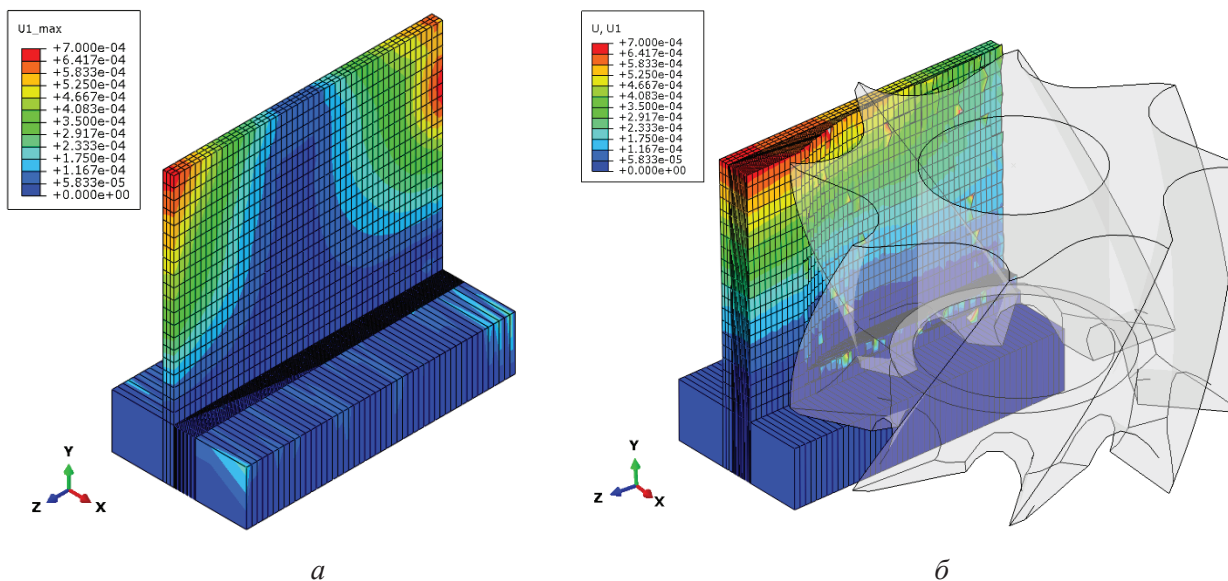


Рис. 5. Поле узловых перемещений заготовки (проекция на OX):

a – максимальные узловые перемещения U_1 на протяжении моделирования; *b* – узловые перемещения на 2,73 с от начала моделирования

Fig. 5. Nodal displacement field (X component):

a – maximum nodal displacements U_1 throughout the simulation; *b* – nodal displacements of 2.73 s from the start of the simulation

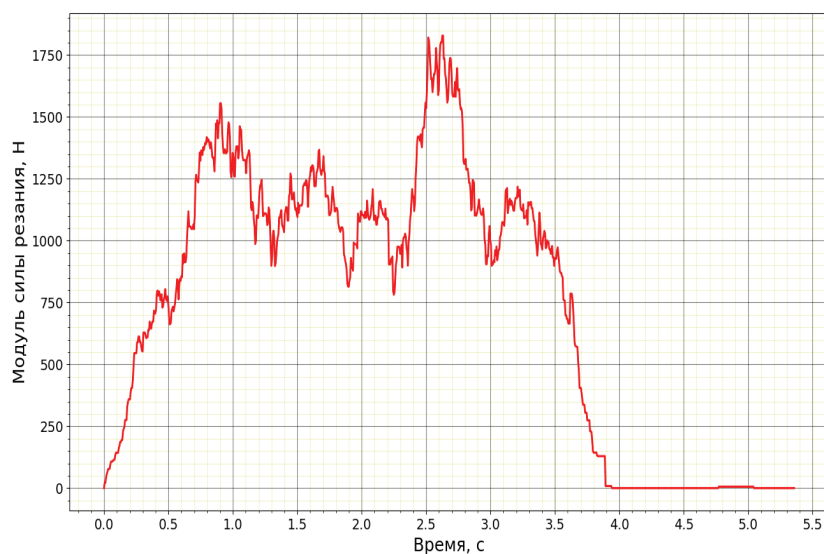


Рис. 6. Зависимость силы резания от времени

Fig. 6. The dependence of cutting force on time

[20]. Разработанная численная модель процесса фрезерования может послужить источником данных о величине силы резания.

Система Abaqus позволяет в рамках анализа результатов для каждой итерации расчета получить значения компонентов сил реакции в контрольной точке, определенной при задании ограничения жесткого тела.

На рис. 7 показана зависимость модуля силы реакции в контрольной точке Tool RP от времени

моделирования. На графике можно выделить три зоны изменения силы: зона возрастания на протяжении врезания фрезы в заготовку; зона установившегося резания и зона выхода инструмента, характеризующаяся уменьшением силы резания. Изменение модуля силы резания в зоне установившегося резания связано с возникновением вибраций и попеременным врезанием и выходом зубьев фрезы из материалов заготовки. Более подробный анализ будет проведен при дальнейшем развитии темы. Цель данной работы – описать основные результаты, которые могут быть получены с использованием разработанной модели.

Наибольший практический интерес представляет прогноз погрешностей формы, возникающий в результате обработки тонкостенной заготовки. Благодаря моделированию процессов снятия материала такой прогноз можно сделать на основе данных, являющихся результатом моделирования. На рис. 7 изображена цветовая диаграмма результирующей толщины стенки. Цвет точки на диаграмме соответствует величине

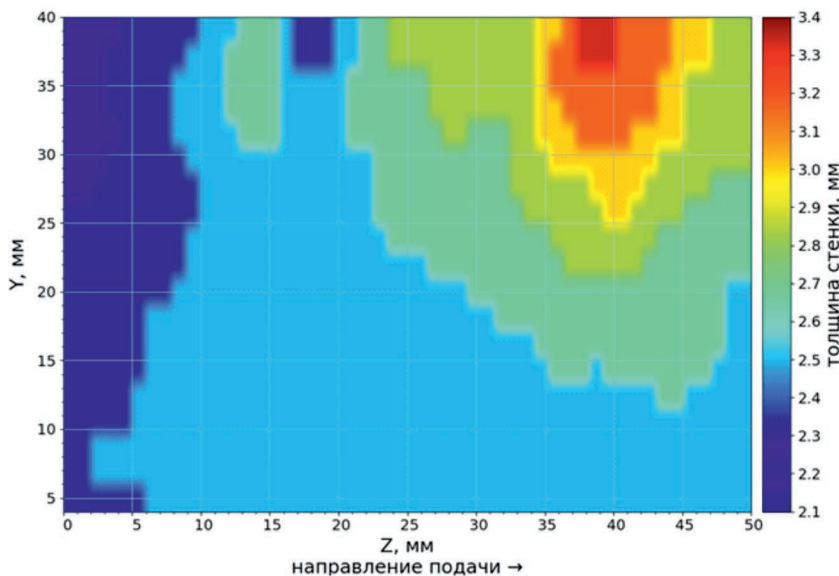


Рис. 7. Диаграмма результирующей толщины стенки

Fig. 7. Result wall thickness diagram

не толщины в миллиметрах: холодные оттенки изображают меньшую толщину стенки, а теплые большую.

Толщина стенки существенно зависит как от горизонтального положения, так и от вертикального. В целом находит свое подтверждение предположение об отклонении верхней части ребра, что вызывает увеличение толщины. Однако для зоны врезания характерно не увеличение, а уменьшение толщины. При врезании фрезы в материал заготовки возникает ударная нагрузка, которая возбуждает колебания с переменной амплитудой. Наибольшая амплитуда соответствует такому положению фрезы, в котором ее ось лежит в плоскости торца заготовки ($Z = 0$, см. рис. 6). Влияние колебаний усиливается при удалении от точки закрепления, поэтому наименьшая толщина стенки соответствует точке с координатой $Y = 40$ мм. При дальнейшем движении инструмента возбужденные ударной нагрузкой колебания затухают и начинают проявляться эффекты, связанные с отклонением заготовки под действием медленно изменяющейся силы резания. Проявление этих эффектов заключается в утолщении стенки по мере роста расстояния от места закрепления. Наибольшая толщина резания зафиксирована в точке с координатами $Z = 39$ мм и $Y = 40$ мм. При выходе инструмента сила резания постепенно уменьшается, следовательно, уменьшается и отклонение заготовки.

Выводы

Для случая попутного фрезерования тонкого ребра разработана модель в системе Abaqus, в которой учитывается податливость заготовки. При разработке приняты некоторые допущения, такие как предположение об абсолютно жестком инструменте или пренебрежение тепловыми эффектами. В дальнейшей работе по этому направлению следует учесть указанные упрощения.

Моделирование учитывает явления разрушения материала заготовки с использованием эмпирической аппроксимации Джонсона–Кука. В целом результаты хорошо согласуются с интуитивными представлениями о механике процесса, но требуют экспериментального подтверждения. Актуальность дальнейших исследований по этой теме подтверждается диаграммой результирующей толщины стенки, согласно которой ее толщина может достигать 3,4 мм вместо ожидаемой 2,5 мм.

С помощью разработанной модели можно строить прогнозы относительно точности фрезерования. Кроме того, система Abaqus позволяет получить важные характеристики процесса, включая силу резания. Эти данные могут быть применены для реализации автоматизированного подбора рациональных режимов резания, в основе которого лежат современные аналитические методики, опирающиеся на известную силу резания.

Список литературы

1. Budak E. Analytical models for high performance milling. Pt. 1. Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 46, N 12–13. – P.1478–1488. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009.
2. Masmali M., Mathew P. Application of a variable flow stress machining theory to helical end milling // Machining Science and Technology. – 2018. – Vol. 22, N 1. – P. 1–29. – DOI: 10.1080/10910344.2017.1336182.
3. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis // Finite element analysis: applications in mechanical engineering /ed. by F. Ebra-



himi. -Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – P. 327–354. – DOI: 10.5772/50374.

4. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts / S. Liu, S. Ratchev, W. Huang, A. Becker // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44, N 15. – P. 1629–1641. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.001.

5. *Shrikrishna N.J., Gururaj B.* Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2017. – Vol. 98, N 3. – P. 343–352. – DOI: 10.1007/s40032-016-0246-9.

6. *Izamshah R., Ding S., Mo J.P.T.* Finite element analysis of machining thin-wall parts // *Key Engineering Materials*. – 2010. – Vol. 458. – P. 283–288. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.

7. *Loehea J., Zaeha M.F., Roescha O.* In-process deformation measurement of thin-walled workpieces // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. – 2012. – Vol. 1. – P. 546–551. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.097.

8. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, M. Kozochkin, Y. Ilyuhin, A. Vorotnikov // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 1023–1026. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.088.

9. *Scippa A., Grossi N., Campatelli G.* FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining // 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC 2014. – 2014. – Vol. 14. – P. 287–292. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.023.

10. *Zelinski P.* 10 tips for titanium // *Modern Machine Shop*. – 2013. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/10-tips-for-titanium> (accessed: 12.08.2019).

11. *Grabowski R., Denkena B., Köhler J.* Prediction of process forces and stability of end mills with complex geometries // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 14. – P. 119–124. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.101.

12. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures / F. Jixiong, L. Bin, X. Juliang, D. Mei, Y. Shuai,

Z. Xiaofeng, Z. Jin // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 32. – P. 403–411. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.03.011.

13. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / А.Д. Жаргалова, С.С. Гаврюшин, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2015. – № 1. – С. 53–60. – DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.

14. *Eremeykin P., Zhargalova A., Gavriushin S.* A software system for thin-walled parts deformation analysis // *AIMEE 2017: Advances in Artificial Systems for Medicine and Education*. – Cham: Springer, 2017. – P. 259–265. – DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_24.

15. *Eremeykin P., Zhargalova A., Gavriushin S.* Experimental substantiation of soft cutting modes method // *AIMEE 2018: Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II*. – Cham: Springer, 2019. – P. 539–547. – DOI: 10.1007/978-3-030-12082-5_49.

16. *Bilstein R.E.* Stages to Saturn: a technological history of the Apollo/Saturn launch vehicle. – Washington, DC: NASA History Office, 1996. – 511 p.

17. *Johnson G.R., Cook W.H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. – The Hague, The Netherlands, 1983. – P. 541–547.

18. *Murugesan M., Dong W.J.* Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications // *Materials*. – 2019. – Vol. 609, N 12. – P. 02.

19. Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach / A. So-hail, K. Mushtaq, J.H.I. Syed, F. Muhammad // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, N 9. – P. 1–14. – DOI: 10.1177/1687814018797794.

20. *Campatelli G., Scippa A.* Prediction of milling cutting force coefficients for aluminum 6082-T4 // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. – 2012. – Vol. 1. – P. 563–568. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.100.

Конфликт интересов

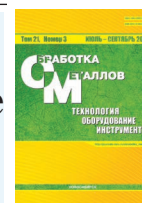
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Problem of Technological Deformations of Thin-Walled Workpieces During Milling

Petr Eremeykin^{1, a, *}, Ayagma Zhargalova^{2, b}, Sergei Gavriushin^{1, 2, c}

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>, eremeykin@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmstu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>, gss@bmstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 June 2019

Revised: 15 July 2019

Accepted: 15 August 2019

Available online: 15 September 2019

Keywords:

Modeling

Milling

Finite Element Analysis

Technological deformation

Thin-walled workpiece

Cutting modes

ABSTRACT

Introduction. Technologists often face the problem of thin-walled workpiece milling. Due to cutting forces the non-rigid workpiece deforms which leads to uneven material removal and surface deflection with respect to specified form. There are several technological tricks that allow to provide given quality parameters but commonly it imply additional material usage or require dedicated facility, so the existing means dramatically affect the total cost of the product. **The purpose of the paper** is to extend a new approach to thin-walled workpiece processing applying to milling process. The approach is called “soft” cutting modes and consists in using numerical modeling for specific technological conditions to select rational parameters of the cutting process. The modelling results are used to pick rational cutting modes that provide the specified quality on the one hand and are economically reasonable on the other hand. Early the software system was developed to simplify such cutting modes calculation for turning. This system can also be used to calculate modes for milling, but a milling model that takes into consideration the technological deformations is required. **The paper considers** the case of climb milling of thin rib with a cylindrical mill. **Research methods:** in the Abaqus system, a numerical FEM model for processing the workpiece is developed taking into account its compliance. **Results and Discussion.** The results are presented as 3D displacement fields, cutting force chart and result wall thickness colorful heatmap. Modelling results analysis allows to conclude that the workpiece flexibility immensely affects the wall final geometry. The obtained deflections are quite sophisticated and irregular that confirms the relevance of numerical modelling approach to predict milling accuracy.

For citation: Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. Problem of technological deformations of thin-walled workpieces during milling. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27. (In Russian).

References

1. Budak E. Analytical models for high performance milling. Pt. 1. Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 46, no. 12–13, pp. 1478–1488. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009.
2. Masmali M., Mathew P. Application of a variable flow stress machining theory to helical end milling. *Machining Science and Technology*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 1–29. DOI: 10.1080/10910344.2017.1336182.
3. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis. *Finite element analysis: applications in mechanical engineering*. Ed. by F. Ebrahimi. Rijeka, Croatia, InTech, 2012, pp. 327–354. DOI: 10.5772/50374.
4. Liu S., Ratchev S., Huang W., Becker A. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, no. 15, pp. 1629–1641. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.001.

* Corresponding author

Eremeykin Petr A., Post-graduate student
 Mechanical Engineering Research Institute
 of the Russian Academy of Sciences
 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok
 101990, Moscow, Russian Federation
 Tel.: +7 (916) 662-57-38, e-mail: eremeykin@gmail.com

5. Shrikrishna N.J., Gururaj B. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2017, vol. 98, no. 3, pp. 343–352. DOI: 10.1007/s40032-016-0246-9.
6. Izamshah R., Ding S., Mo J.P.T. Finite element analysis of machining thin-wall parts. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 458, pp. 283–288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.
7. Loehea J., Zaeha M.F., Roescha O. In-process deformation measurement of thin-walled workpieces. *5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012*, 2012, vol. 1, pp. 546–551. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.097.
8. Isaev A., Grechishnikov V., Pivkin P., Kozochkin M., Ilyuhin Y., Vorotnikov A. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 1023–1026. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
9. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC 2014*, 2014, vol. 14, pp. 287–292. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.023.
10. Zelinski P. 10 tips for titanium. *Modern Machine Shop*. 2013. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/10-tips-for-titanium> (accessed 12.08.2019).
11. Grabowski R., Denkena B., Köhler J. Prediction of process forces and stability of end mills with complex geometries. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.101.
12. Jixiong F., Bin L., Juliang X., Mei D., Shuai Y., Xiaofeng Z., Jin Z. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 32, pp. 403–411. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.03.011.
13. Zhargalova A.D., Gavryushin S.C., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. Metod opredeleniya uslovii mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei [Method for determining the processing conditions of thin-walled parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 1, pp. 53–60. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.
14. Eremeykin P., Zhargalova A., Gavriushin S. A software system for thin-walled parts deformation analysis. *AIMEE 2017: Advances in Artificial Systems for Medicine and Education*. Cham, Springer, 2017, pp. 259–265. DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_24.
15. Eremeykin P., Zhargalova A., Gavriushin S. Experimental substantiation of soft cutting modes method. *AIMEE 2018: Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II*. Cham, Springer, 2019, pp. 539–547. DOI: 10.1007/978-3-030-12082-5_49.
16. Bilstein R.E. *Stages to Saturn: a technological history of the Apollo/Saturn launch vehicle*. Washington, DC, NASA History Office, 1996. 511 p.
17. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, 1983, pp. 541–547.
18. Murugesan M., Dong W.J. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications. *Materials*, 2019, vol. 609, no. 12, p. 02.
19. Sohail A., Mushtaq K., Syed J.H.I., Muhammad F. Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 9, pp. 1–14. DOI: 10.1177/1687814018797794.
20. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for aluminum 6082-T4. *5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012*, 2012, vol. 1, pp. 563–568. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.100.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).