

УДК 621.914.1+658.52 (045)

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-27-37

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПОРНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ\*

С. А. Погудин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Н. С. Сивцев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Г. Бажин, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Переменный характер силы резания и податливость системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» обуславливают неравномерность упругих деформаций заготовки, составляющих значительную часть погрешности лезвийной обработки. Для повышения точности деталей необходимо управлять упругими деформациями заготовки. Особо значимо выполнение этого требования при обработке нежестких (тонкостенных) деталей.*

*Приведена систематизация способов управления упругими деформациями таких деталей, стабилизирующих и снижающих величину упругих деформаций. Показано, что наибольшее число способов разрабатывается в направлении снижения упругих деформаций заготовки в процессе резания. Это достигается либо за счет уменьшения сил резания, либо за счет повышения жесткости заготовки способами, отнесенными к группе «жертвенных» и опорных.*

*Представлены результаты экспериментальных исследований точности обработки нежестких деталей фрезерованием с применением опорного модуля – блока из нескольких подвижных опор, которые препятствуют упругой деформации заготовки при обработке. Установлено, что на отклонения формы поверхностей деталей, обработанных с применением вспомогательного опорного модуля, существенно влияет расположение опор. В сечениях заготовки, удаленных от режущего инструмента, вследствие упругой деформации возможен ее отрыв от опор, что приводит к дополнительным вибрациям заготовки и снижению качества поверхности по параметрам шероховатости.*

*Для устранения отрыва предложен новый способ фиксации нежестких заготовок на опорах и приспособление для его реализации. Способ включает базирование и закрепление заготовки, подведение к ее опорной поверхности блока подвижных опор и последующее приложение к заготовке со стороны обрабатываемой поверхности равномерно распределенного давления. Приспособление для фиксации нежестких заготовок предложенным способом содержит двухмерный массив самоустанавливающихся опор, жестко фиксируемых в соответствующем положении механизмом фиксации. Часть опор снабжены вакуумными присосками, установленными на их верхних концах и связанными с системой вакууммирования.*

**Ключевые слова:** точность, нежесткие детали, фрезерование, сила резания, упругие деформации, опорный модуль.

### Введение

Важным фактором развития различных отраслей машиностроения является увеличение номенклатуры нежестких (тонкостенных) деталей сложного профиля, в том числе крупногабаритных с плоскими или криволинейными поверхностями. Малый вес тонкостенных деталей, изготовленных из современных материалов, обладающих высокой прочностью и сопротивлением усталости, трещиностойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, определяет их широкое применение в изделиях ракетно-, авиа-, вертолето-, авто-, судо-, приборостроения и др. Точность

размеров, формы, расположения, а также волнистость и шероховатость рабочих поверхностей таких деталей относится к числу важнейших геометрических показателей, определяющих их эксплуатационные свойства.

Несмотря на современные тенденции к более широкому использованию безотходных технологий формообразования поверхностей, механическая обработка резанием и, в частности, фрезерование концевыми фрезами (в том числе контурное) на станках с ЧПУ сегодня широко используется для изготовления высокоточных деталей сложного профиля с плоскими и криволинейными поверхностями (рис. 1).

© Погудин С. А., Сивцев Н. С., Бажин А. Г., 2019

\* Статья написана в рамках гранта для ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, шифр № 15.04.05/18 СНС (приказ от 29.12.2018 г. № 1494 «О грантовой поддержке приоритетных исследований ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»).

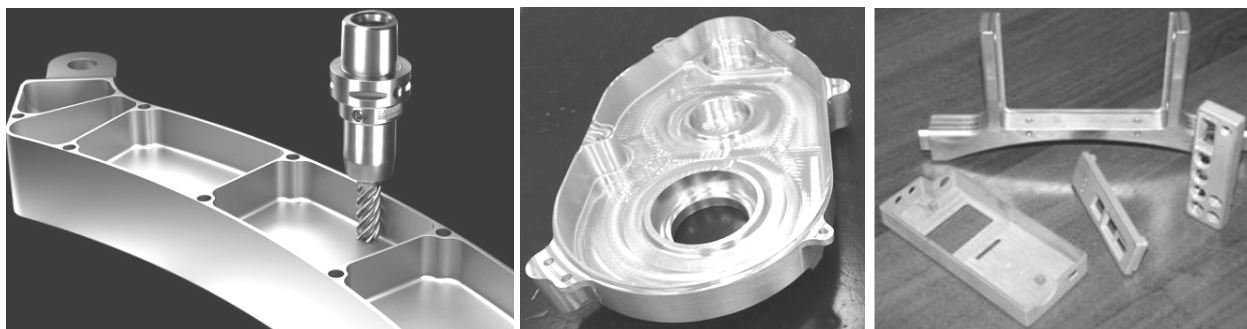


Рис. 1. Примеры нежестких деталей сложного профиля

Fig. 1. Examples of non-rigid parts of complex profile

Вместе с тем изготовление такого рода деталей с тонкими стенками вызывает трудности. Объясняется это тем, что малая жесткость заготовки в сочетании с нестабильностью сил резания, обусловленной неравномерностью припуска и неоднородностью обрабатываемого материала, увеличивает погрешность обработки от ее упругой деформации. Проблема усугубляется также тем, что при фрезеровании происходит прерывистое воздействие каждого зуба фрезы на заготовку, сопровождающееся изменением сил резания по величине при входе и выходе зуба из заготовки от минимального значения до максимального при встречном фрезеровании и, наоборот, – от максимального значения до минимального при попутном фрезеровании. Периодический характер изменения сил резания является причиной вынужденных колебаний (вибраций) всех элементов системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), причем в случае тонкостенной детали амплитуда ее колебаний оказывается весьма значительной, что также негативно отражается на показателях геометрической точности. Немаловажна и негативная роль внутренних напряжений в тонкостенной заготовке, которые, в свою очередь, при снятии припуска могут дополнительно вызвать значительную и непрогнозируемую упругую деформацию детали.

Таким образом, перед технологом при проектировании операций фрезерования нежестких деталей сложного профиля задача конструкторско-технологического обеспечения требуемой точности является первоочередной. При этом большое внимание следует обращать на оптимизацию процесса фрезерования по критериям производительности и себестоимости.

Цель исследования – разработка нового способа снижения погрешности обработки от упругих деформаций нежестких деталей при фрезеровании.

### Способы снижения погрешности обработки от упругих деформаций нежестких деталей при лезвийной обработке

Результаты анализа научной и патентной литературы позволяют систематизировать известные способы управления упругими деформациями нежестких деталей при механической обработке в две большие группы – стабилизирующих и снижающих величину упругих деформаций (рис. 2).

Способы адаптивного (самоприспосабливающегося) управления точностью обработки основаны на регулировании в процессе резания упругих отжатий в технологической системе, вызванных колебаниями припуска и твердости заготовки. Активный контроль процесса резания в адаптивных системах позволяет осуществлять выбор режимов резания в соответствии с фактической обрабатываемостью материала и параметрами заготовки. Наиболее эффективный метод контроля процесса резания основан на измерении силы резания. На основе данных о силе резания адаптивная система производит расчет оптимальных режимов резания – величины подачи и частоты вращения шпинделя [1, 2].

Другой подход основан на математическом моделировании напряженно-деформированного состояния заготовки, подвергнутой нагрузению внешними силами (резания, зажима, реакции опор), подборе сил резания, обеспечивающей в каждом сечении заготовки равную деформацию, расчете подачи, соответствующей этим силам, и последующей разработке в САМ-системе управляющей программы, реализующей процесс резания с этими режимами [3–9].

Инструментальные способы снижения величины упругих деформаций заготовки основаны на выборе рациональной конструкции, геометрических параметров и материала режущего инструмента. Так, например, использование при

обработке маложестких деталей концевых фрез с неравномерным шагом зубьев, с постоянно изменяющимся углом наклона зуба, с волнообразной режущей кромкой (рис. 3) снижает силы резания, напряжения и температуру в теле заготовки, нарушает строго периодический, цикли-

ческий характер изменения действующих сил, что приводит к уменьшению упругих деформаций (Патент RU 2507038C1, МПК В23С5/10), [10–14]. Постоянство условий резания позволяет сохранить выбор соответствующим условиям обработки марки инструментального материала.



Рис. 2. Классификация способов снижения погрешности обработки от упругих деформаций нежестких деталей при лезвийной обработке

Fig. 2. Classification of methods to reduce processing error from elastic deformation of non-rigid parts during blade cutting

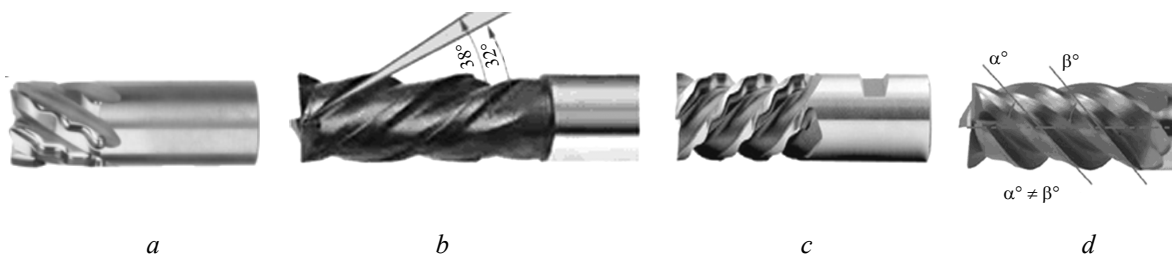


Рис. 3. Конструкции концевых фрез для обработки деталей сложного профиля из титана различных фирм: a – ООО «ПК МИОН» (Россия); b – Weldon (США); c – STOCK (Германия); d – Mitsubishi (Япония)

Fig. 3. Designs of end mills for processing parts of complex profiles from titanium of various companies: a - LLC PC MION (Russia); b - Weldon (USA); c - STOCK (Germany); d - Mitsubishi (Japan)

Благодаря появлению современных станков с ЧПУ, быстродействующих систем управления и соответствующего программного обеспечения для автоматизированного программирования стало возможным появление новых способов снижения погрешности обработки нежестких деталей от упругих деформаций, условно отнесенных к группе кинематических. В этих способах существенное уменьшение сил резания при обработке достигается за счет выбора рациональной стратегии, метода фрезерования и траектории движения инструмента (Стратегии

и методы обработки, применяемые при фрезеровании. Опыт применения в производстве. URL: <http://instrument-invest.com/seco/13.pdf>; Стратегия Vortex и технология оптимизации Machine DNA от компании Delcam. Новые возможности для повышения производительности фрезерной обработки. URL: [http://www.informdom.com/uploads/docs/files/2013/1/462/Delcam\\_Metal\\_2013\\_112\\_115.pdf](http://www.informdom.com/uploads/docs/files/2013/1/462/Delcam_Metal_2013_112_115.pdf)), [15, 16]. Ярким примером является применение стратегий высокоскоростного фрезерования (СВС) и сверхвысокоскоростного фрезерования (ССФ) с применением трохои-

дальной (петельной, спиральной) или вихревой траекторий движения фрезы.

Принципиально иной подход к решению задачи снижения погрешности обработки от упругих деформаций при фрезеровании нежестких деталей реализуется в способах, обеспечивающих повышение жесткости заготовки на время их обработки. В их числе способы, в которых для повышения жесткости тонкостенных элементов деталей в конструкцию заготовки вводятся «жертвенные» элементы (рис. 4). Эти эле-

менты, не являясь функциональной частью готовой детали, на время обработки повышают жесткость заготовки, что позволяет уменьшить величину ее упругих деформаций от сил резания (ScottSmith, Robert Wilhelm, Brian Dutterer, Harish Cherukuri, Gaurav Goel, CIRP Annals. Sacrificial structure preforms for thin part machining. Manufacturing Technology 61 (2012) 379-382 0007-8506/\$ - see front matter, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.142>).

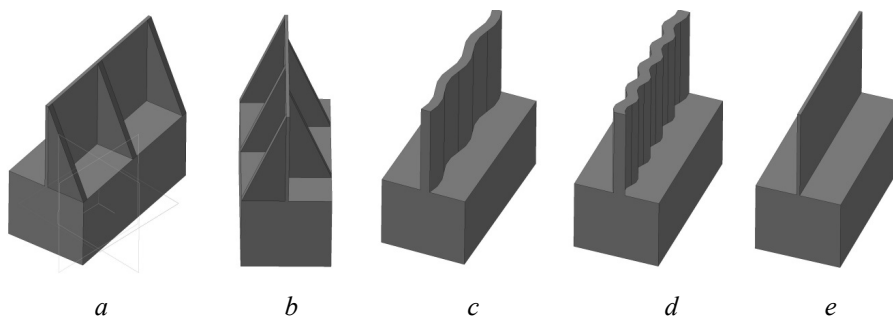


Рис. 4. Образцы заготовок с «жертвенными» элементами: в виде опор с одной (а) и обеих (b) сторон; в виде синусоидального гофра с длинной (с) и короткой (d) волнами; (e) – готовая деталь

Fig. 4. Samples of blanks with sacrificial elements: in the form of supports with one (a) and both (b) parties; in the form of a sinusoidal corrugation with a long (c) and short (d) waves (e) – finished part

В других способах, отнесенных к этой группе, «жертвенные» элементы вводятся в конструкцию заготовки по ходу выполнения операции. Так, например, при обработке фрезерованием межлопаточных каналов моноколес или крыльчаток газотурбинных двигателей из цельной заготовки для предотвращения упругих деформаций лопастей от сил резания обработка номерованных межлопаточных каналов производится с пропуском через один. Затем в обработанные межлопаточные каналы заливают сплав, например Вуда, и фрезеруют соседние межлопаточные каналы, после чего удаляют сплав путем выплавления (патент RU 2300447 C2, МПК В23С3/18, В23Р15/02).

В опорных способах повышение жесткости обеспечивается за счет реализации схем установки нежестких заготовок, при которых в ходе обработки им оказывается дополнительная поддержка путем установки вспомогательных неподвижных и подвижных опор, которые препятствуют ее деформациям при обработке (патент RU 2589957 C2, МПК В23Q15/00, В23Q1/25; Робот-станок с параллельной кинематикой. URL: <http://alphajet.ru/content/robot-stanok-s-parallelnoi-kinematikoi>), [17].

Для тонкостенных заготовок сложного профиля применение опорных способов увеличения жесткости наиболее эффективно в случае при-

менения не отдельных опор, а вспомогательного опорного модуля – блока из нескольких подвижных опор, регулируемых, подводимых или самоустанавливающихся (Kostyrka UHF chucking device. URL: <https://www.todaysmotorvehicles.com/product/kostyrka-uhf-chucking-device-38291>; патент RU 2553171 C2, МПК В23Q 1/03; патент RU 2277466 C2, МПК В23Q003/155). Каждая из этих опор контактирует с деталью в разных точках поверхности, создавая в этих точках усилие реакции при оказании силового воздействия по ходу резания (рис. 5).



Рис. 5. Вспомогательный опорный модуль фирмы KOSTYRKA (Германия)

Fig. 5. Auxiliary support module of the company KOSTYRKA (Germany)

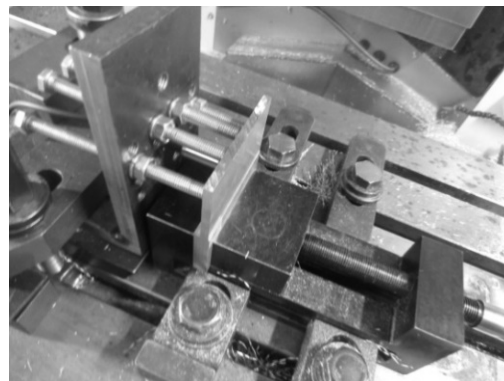
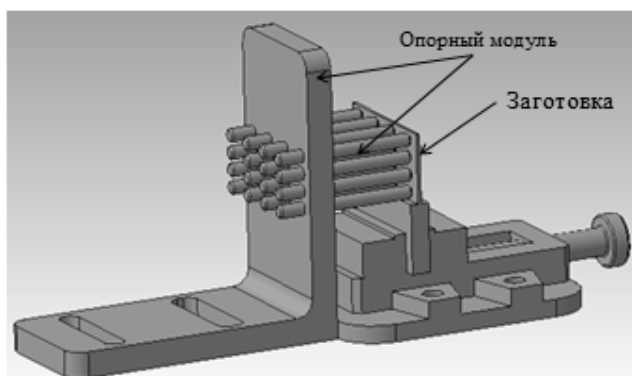
Выполненные эксперименты проведены с целью оценки влияния на точность фрезерной обработки нежестких деталей вспомогательных опорных модулей с различными комбинациями расположения регулируемых опор на поверхности, оппозитной к обрабатываемой.

**Описание и результаты экспериментов**

В проведенных экспериментах вспомогательный опорный модуль выполнен в виде сварного уголка с отверстиями под болты М8, которые использовались в качестве регулируе-

мых опор (рис. 6) при попутном фрезеровании тонкостенных заготовок толщиной 4 мм, изготовленных из алюминиевого сплава Д16Т (табл. 1).

Фрезерование экспериментальных образцов проводилось на вертикально-фрезерном станке модели Akira-Seiki Performa V2 Vertical Machining Center с системой управления FANUC Seriesoi-MD твердосплавной концевой фрезой (табл. 2) с подачей 0,5 мм/зуб и частотой вращения шпинделя 1500 об/мин.



a

b

Рис. 6. Экспериментальный опорный модуль: a – схема; b – опытный образец

Fig. 6. Experimental reference module: a - scheme; b - prototype

Таблица 1. Механические свойства алюминиевого сплава Д16Т

Table 1. Mechanical properties of aluminum alloy D16T

Плотность	Предел прочности (при растяжении/ разрыв)	Модуль (нормальной упругости) Юнга	Коэффициент Пуассона
2710 кг/м <sup>3</sup>	105 МПа	85 ГПа	0,33

Таблица 2. Параметры режущего инструмента

Table 2. Cutting tool parameters

Материал инструмента	Твердый сплав
Диаметр инструмента, мм	10
Длина режущей части, мм	50
Угол наклона винтовой линии, град	37
Передний угол режущего инструмента, град	12
Задний угол режущего инструмента, град	15
Количество зубьев	4

В ходе попутного фрезерования заготовок (рис. 7, a) сьем припуска производился в несколько проходов с глубиной резания 0,5 мм до достижения конечной толщины 1,5 мм. После каждого прохода в трех горизонтальных сечениях (в каждом в пяти точках) микрометром МК 0-25 ГОСТ 6507–78 с ценой деления 0,002 мм производились измерения обработанной поверхности (рис. 7, б).

Базирование и закрепление заготовок производилось в тисках без дополнительных опор (рис. 8, a) и с применением вспомогательного опорного модуля с различными комбинациями расположения 4 регулируемых опор (рис. 9, a; 10, a).

Анализ результатов измерения показал, что при уменьшении отклонения формы поверхностей деталей, обработанных с применением вспомогательного опорного модуля (рис. 6; 9, b; 10, b; 11) на величину этих отклонений существенно влияет расположение опор (рис. 9, b; 10, b).

Для определения оптимальной схемы размещения и количества опор в опорном модуле при обработке тонкостенных деталей сложного профиля в конечно-элементном программном комплексе ANSYS выполнен анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенной заготовки сложного профиля под действием сил

резания. Полученные результаты показали, что при фрезеровании в сечениях заготовки, удаленных от режущего инструмента, вследствие упругой деформации возможен ее отрыв от опор

(рис. 11, *a*). Это приводит к дополнительным вибрациям заготовки, что объясняет снижение качества поверхности по параметрам шероховатости (рис. 11, *b*).

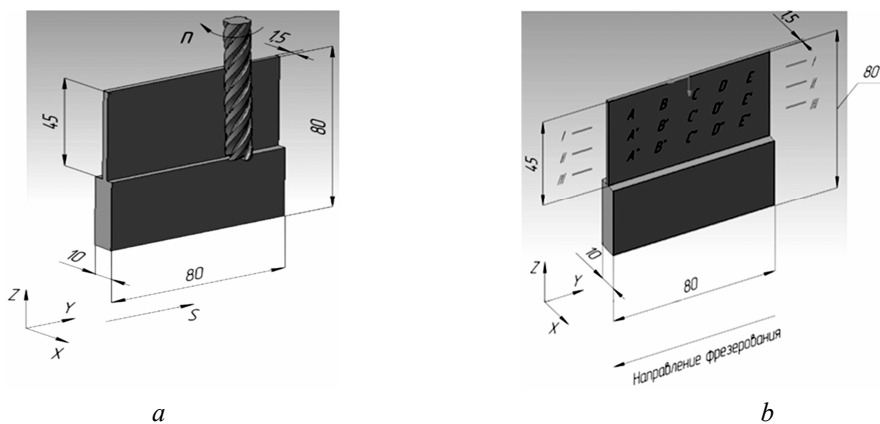


Рис. 7. Схема фрезерования (*a*) и измерения (*b*) экспериментальных образцов

Fig. 7. The scheme of milling (*a*) and measurement (*b*) of experimental samples

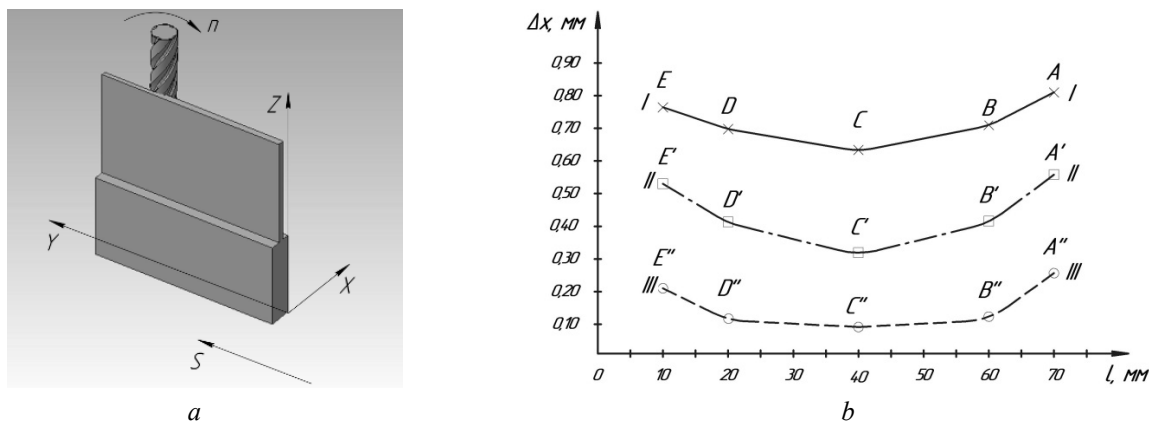


Рис. 8. Схема фрезерования (*a*) и отклонение формы поверхности обработанной детали в сечениях I-I, II-II, III-II (*b*) без применения вспомогательного опорного модуля

Fig. 8. The milling pattern (*a*) and the deviation of the surface shape of the machined part in sections I-I, II-II, III-II (*b*) without the use of an auxiliary support module

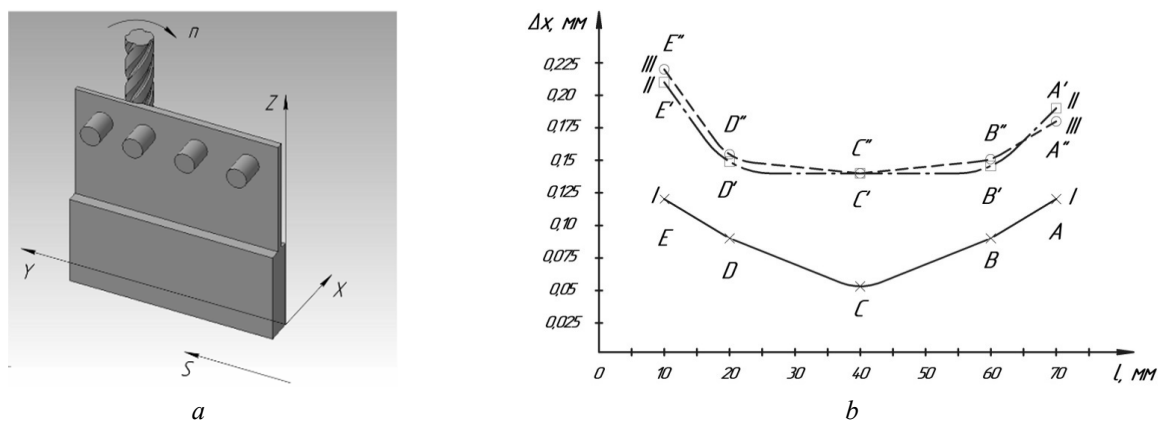


Рис. 9. Схема фрезерования (*a*) и отклонение формы поверхности обработанной детали в сечениях I-I, II-II, III-II (*b*) с применением вспомогательного опорного модуля из 4 опор

Fig. 9. The milling pattern (*a*) and the deviation of the surface shape of the machined part in sections I-I, II-II, III-II (*b*) using an auxiliary support module of 4 supports

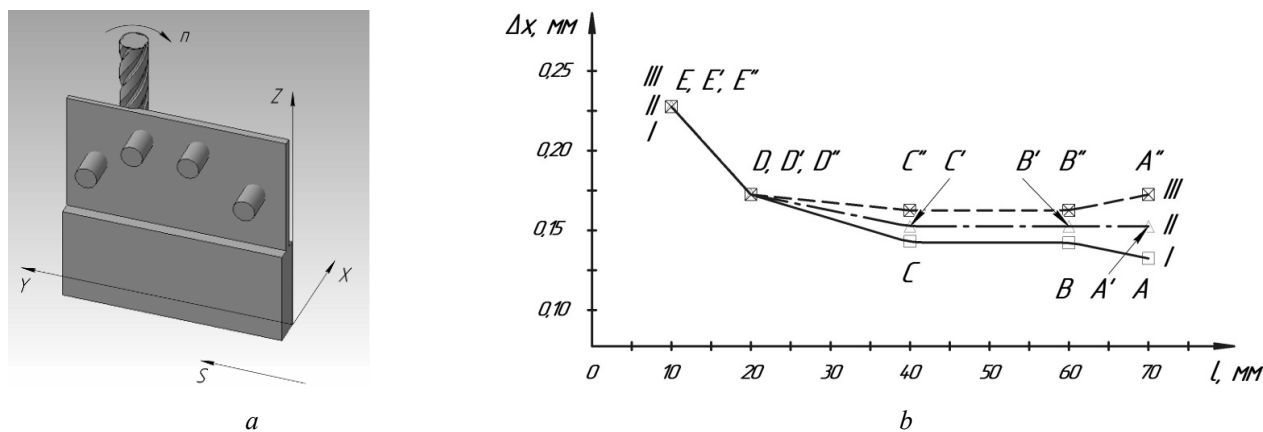


Рис. 10. Схема фрезерования (а) и отклонение формы поверхности обработанной детали в сечениях I-I, II-II, III-II (b) с применением опорного модуля из 4 опор (положение опор изменено)

Fig. 10. The milling pattern (a) and the deviation of the surface shape of the machined part in sections I-I, II-II, III-II (b) using an auxiliary support module of 4 supports

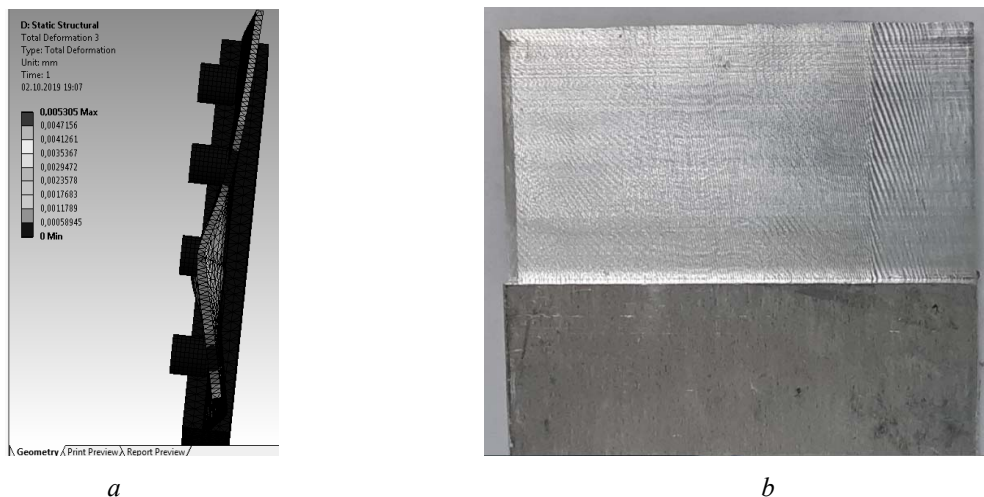


Рис. 11. Деформации тонкостенной заготовки при фрезеровании с применением опорного модуля из 4 опор (а) и фотография обработанной поверхности (b)

Fig. 11. Deformation of a thin-walled workpiece during milling using a support module of 4 supports (a) and a photograph of the machined surface (b)

Для устранения этого негативного явления предложена конструкция приспособления с опорным модулем фиксации нежесткой заготовки сложного профиля, в котором при фрезеровании исключается ее отрыв от поддерживающих опор (патент RU 2701815 С1, МПК В23Q 1/26, В25В 11/00).

**Приспособление для фиксации нежесткой заготовки сложного профиля**

Приспособление (рис. 12) имеет базовый корпус-плиту 1 с сеткой крепежных резьбовых отверстий 2 для фиксации на плите постоянных опор и зажимных элементов. В плите имеются также резьбовые отверстия для установки в них вспомогательных самоустанавливающихся опор без вакуумных 3 и с вакуумными 4 присосками. Эти отверстия соединены с выполненными

в плите каналами, через которые подается масло под давлением в глухие отверстия направляющих стержней опор 5. На направляющих стержнях размещаются подпружиненные пружиной 6 втулки 7 с глухими отверстиями и втулки 8 со сквозными отверстиями. На верхнем конце каждой втулки 8 выполнена расточка, образующая сферическую поверхность, на которую опирается подтянутая к ней пружиной 9 сферическая пята 10 с вакуумной присоской 11. Сферическая пята 10 с центром на оси втулки 8 имеет возможность поворота вокруг координатных осей X и Y и обеспечивает плотность первоначального прилегания вакуумной присоски 11 к технологической установочной базе заготовке при различных макрогеометрических погрешностях ее формы. Все сферические пяты 10 имеют кана-



лы для откачки воздуха из замкнутой полости, образованной вакуумной присоской 11 и поверхностью контактирующей с ней заготовки, и резь-

бовые отверстия для ввинчивания в них штуцеров, предназначенных для соединения сферических пят между собой вакуумными шлангами 12.

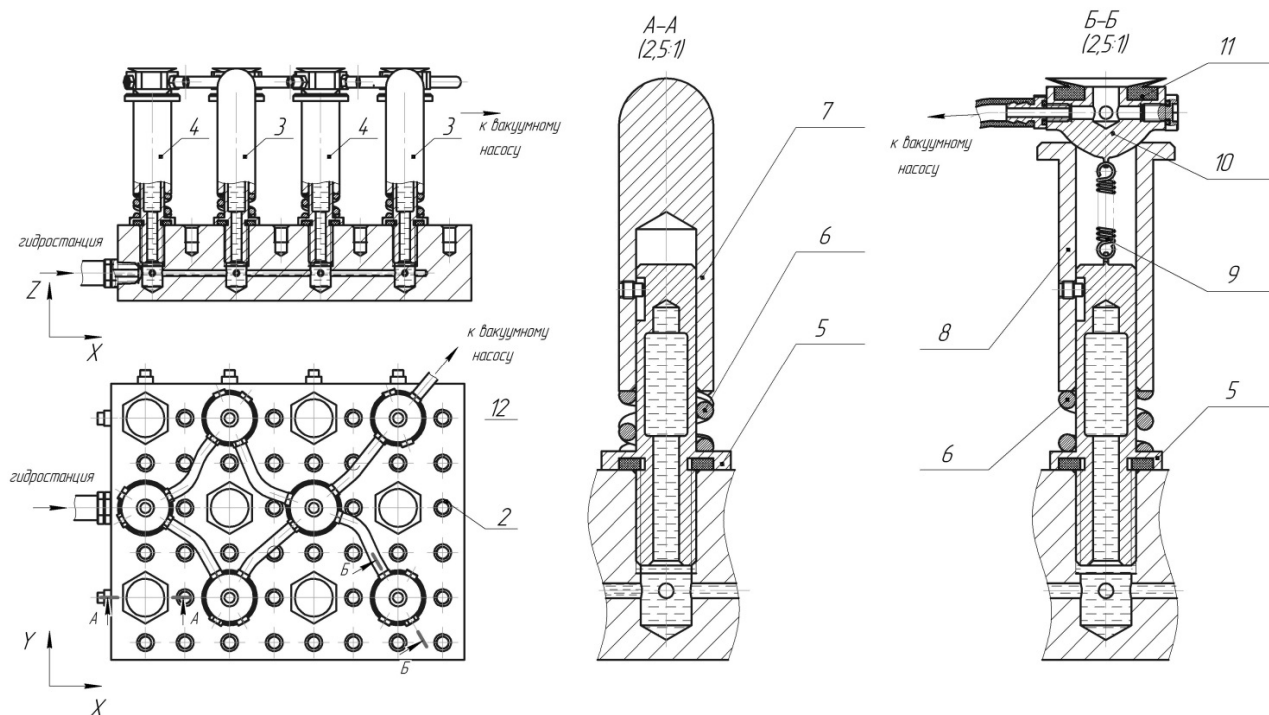


Рис. 12. Приспособление для фиксации нежесткой заготовки сложного профиля

Fig. 12. A device for fixing a non-rigid workpiece with a complex profile

Приспособление работает следующим образом.

В соответствии с принятой схемой установки нежесткой заготовки на операции через резьбовые отверстия 2 в корпусе-плите 1 монтируют постоянные опоры и зажимные элементы приспособления. Верхние опорные точки самоустанавливающихся опор при этом должны быть выше опорных точек постоянных опор. В ходе базирования заготовки и сближения ее технологической установочной базы с постоянными опорами каждая из подпружиненных втулок 7 и 8 самоустанавливающихся опор, сжимая пружины 6 и 9, перемещается по оси Z. После контакта заготовки с постоянными опорами и ее закрепления самоустанавливающиеся опоры займут свое положение в соответствии с геометрической формой технологической установочной базы заготовки. Их жесткая фиксация в этом положении производится за счет упругой деформации тонкой стенки направляющих стержней 5, приводящей к возникновению контактных давлений и сил трения в соединениях стержней с втулками 7 и 8. Деформация стержней 5 осуществляется маслом, нагнетаемым под давлением в их замкнутую полость через кана-

лы и резьбовые отверстия в плите 1. Источником давления масла может быть, например, гидростанция гидрофицированного станка, на котором выполняется операция. После жесткой фиксации самоустанавливающихся опор вакуумнасосом через вакуумные шланги 12, соединяющие все сферические пят 10 опоры с вакуумной присоской производится откачка воздуха и создание вакуума в замкнутых полостях, образованных вакуумными присосками 11 и поверхностью контактирующей с ней заготовки.

В результате над каждой самоустанавливающейся опорой с вакуумной присоской со стороны обрабатываемой поверхности заготовки возникает дополнительное давление и сила  $F_i$ , определяемая по формуле

$$F_i = (p_{\text{атм}} - p_{\text{ост}}) S_i k_T, \quad (1)$$

где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление;  $p_{\text{ост}}$  – давление разрежения в замкнутой полости;  $S_i$  – активная площадь замкнутой полости образованной вакуумной присоской,  $\text{мм}^2$ ;  $k_T$  – коэффициент герметичности системы,  $k_T = 0,8 \dots 0,85$  [18].

Внешняя сила  $F$ , действующая на заготовку:

$$F = F_i n, \quad (2)$$



где  $n$  – количество в приспособлении самоустанавливающихся опор с вакуумными присосками.

Суммарное дополнительное давление, действующее со стороны обрабатываемой поверхности заготовки и поджимающее ее ко всем самоустанавливающимся опорам с учетом (1) и (2):

$$p_{\text{доп}} = F/S = [(p_{\text{атм}} - p_{\text{ост}})S_i k_T n] / S,$$

где  $S$  – площадь заготовки со стороны обрабатываемой поверхности, мм<sup>2</sup>.

Для более равномерного приложения дополнительного давления в двухмерном массиве самоустанавливающихся опор опоры с вакуумными присосками и без вакуумных присосок размещают в шахматном порядке.

### Выводы

1. Выполненный анализ показывает, что известные способы минимизации погрешности лезвийной обработки нежестких деталей от упругих деформаций разрабатываются в двух направлениях – стабилизации и снижения этих деформаций различными конструкторско-технологическими приемами. Предложенная систематизация способов позволяет не только выбрать способ управления упругими деформациями заготовки из уже имеющихся, но и разрабатывать при необходимости новые способы.

2. К числу эффективных способов снижения упругих деформаций нежестких деталей сложного профиля относятся опорные способы повышения жесткости заготовки с применением вспомогательного опорного модуля – блока из нескольких подвижных опор, которые препятствуют упругой деформации заготовки при обработке. Экспериментально подтверждено, что на геометрические показатели точности нежестких деталей, обработанных с применением вспомогательного опорного модуля, существенно влияет количество и расположение опор. Для определения оптимальной схемы размещения подвижных опор в опорном модуле при обработке нежестких деталей сложного профиля в каждом конкретном случае требуется анализ их напряженно-деформированного состояния под действием сил резания в САЕ-системах инженерного анализа.

3. В случаях применения опорных модулей для уменьшения погрешности обработки от упругих деформаций в сечениях заготовки, удаленных от режущего инструмента, вследствие упругой деформации возможен ее отрыв от опор, что приводит к дополнительным вибрациям заготовки и снижению качества поверхности по параметрам шероховатости. Для устранения

отрыва предложен новый способ фиксации нежестких заготовок на опорах и приспособление для его реализации.

### Библиографические ссылки

1. *Никитина Л. Г.* Адаптивное управление станками // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2011. № 3. С. 61–65.
2. *Кувшинский В. В.* Фрезерование. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
3. *Ермина Ю. А., Щенятский А. В.* Предпосылки к созданию методики обеспечения точности обработки мало жестких деталей (МЖД) на основе результатов численного моделирования // *Вестник ИжГТУ*. 2011. № 2 (50). С. 59–62.
4. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах / *И. В. Горбунов, И. В. Ефременков, В. Л. Леонтьев, А. Р. Гисметулин* // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15, № 4. С. 846–853.
5. Технологическое обеспечение точности фрезерования нежестких деталей / *А. В. Балашов, А. С. Жидецкая, И. С. Потапов, Т. Г. Светлова* // *Вестник Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема*. 2015. № 2 (19). С. 18–22.
6. *Унянин А. Н.* Повышение точности мало жестких деталей за счет компенсации упругих деформаций заготовок в процесс обработки // *Вестник современных технологий*. 2016. № 2. С. 75–80.
7. *Ковалевский С. В., Ковалевская Е. С.* Обеспечение точности обработки деталей машин на станках с ЧПУ с применением корректирующей модели // *Захист металургійних машин від поломок : зб. наукових праць*. Вип. 11. / ПДТУ. Маріуполь, 2009. С. 309–314.
8. *Ковалевский С. В., Ковалевская Е. С.* Нейросети в управлении точностью обработки резанием : монография. Краматорск : ДГМА, 2009. 136 с.
9. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / *С. С. Гаврюшин, А. Д. Жаргалова, Г. П. Лазаренко, В. И. Семисалов* // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 11 (668). С. 53–61.
10. *Кугультинов С. Д., Жилиев А. С.* Совершенствование процесса фрезерования деталей сложной формы из алюминиевых сплавов благодаря управлению величиной силы резания // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. № 1 (21). С. 75–78.
11. *Никулин Д. С., Савилов А. В.* Разработка концевых фрез для высокопроизводительной обработки авиационных деталей в условиях Иркутского авиационного завода // *Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов : материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара (Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.)*. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 55–63.
12. *Потапов М. С., Виноградов Д. В.* Обзор фрез с криволинейной режущей кромкой // *Наука и образование*. 2014. № 11. С. 21–33.

13. Dai Bing, Yu Guang-bin, GuanYan-qi, ShaoJun-peng, Wu Xue-mei, Liu Yu-xin. Machining Surface Quality Analysis of Aluminum Alloy Thin-Walled Parts in Aerospace. *International Journal of Security and Its Applications*, 2015, vol. 9, pp. 201-208.

14. Sridhar G., Babu P.R. Understanding the challenges in machining thin walled thin floored Avionics components. *Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 2013, vol. 2, pp. 93-100.

15. Аверченков А. В. Автоматизация выбора стратегий обработки конструкторско-технологических элементов деталей в технологической подготовке производства изделий // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 3 (48). С 76–80.

16. Красильникова В. А., Кузультинов С. Д. Выбор стратегии обработки резанием сложных поверхностей в системе автоматизированного проектирования // Вопросы науки и образования: Теоретические аспекты : материалы Международной (заочной) научно-практической конференции ; под общ. ред. А. И. Вострецова. Нефтекамск : Мир науки, 2017. С. 116–121.

17. Горошкин А. К. Приспособления для металло-режущих станков : справочник. 7-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1979. 303 с.

18. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / ред. совет Б. Н. Вардашкин (пред.) [и др.]. М. : Машиностроение, 1984. Т. 1 / под ред. Б. Н. Вардашкина, В. В. Данилевского. 592 с.

### References

1. Nikitina L.G. [Adaptive control of machine tools]. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2011, no. 3, pp. 61-65 (in Russ.).

2. Kuvshinsky V.V. *Frezerovanie* [Milling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 240 p. (in Russ.).

3. Eremina Yu.A., Shchenyatsky A.V. [Prerequisites for the creation of a methodology for ensuring the accuracy of machining of low-rigid parts (MZD) based on the results of numerical modeling]. *Vestnik IzhGTU*, 2011, no. 2, pp. 59-62 (in Russ.).

4. Gorbunov I.V., Efremenko I.V., Leont'ev V.L., Gismetulin A.R. [Features of modeling of machining processes in CAE-systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 846-853 (in Russ.).

5. Balashov A.V., Zhidetskaya A.S., Potapov I.S., Svetlova T.G. [Technological support of milling accuracy of non-rigid parts]. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Sholom-Aleikhema*, 2015, no. 2, pp. 18-22 (in Russ.).

6. Unyanin A.N. [Improving the accuracy of low-rigid parts by compensating for elastic deformations of workpieces during processing]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 75-80 (in Russ.).

7. Kovalevsky S.V., Kovalevskaya E.S. [Ensuring the accuracy of machining of machine parts on CNC machines with the use of a corrective model]. *Zakhist metalurginikh mashin vid polomok*, vol. 11, PDTY, Mariupol, 2009, pp. 309-314 (in Russ.).

8. Kovalevsky S.V., Kovalevskaya E.S. [Neural networks in the management of precision machining]. Kramatorsk, Donbass State Engineering Academy Publ., 2009, 136 p. (in Russ.).

9. Gavryushin S.S., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. [Method for determining the conditions of machining of thin-walled parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2015, no. 11, pp. 53-61 (in Russ.).

10. Kugultinov S.D., Zhilyaev A.S. [Improving the process of milling parts of complex shape from aluminum alloys due to the control of the cutting force]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 1, pp. 75-78 (in Russ.).

11. Nikulin D. S., Savilov A.V. *Razrabotka kontsevykh frez dlya vysokoproizvoditel'noi obrabotki aviatsionnykh detalei v usloviyakh Irkutskogo aviatsionnogo zavoda* [Development of end mills for high-performance processing of aircraft parts in the conditions of the Irkutsk Aviation Plant]. *Materialy Vserossiiskogo s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskogo seminara "Vysokoeffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki i izgotovleniya samoletov" (Irkutsk, 9-11 noyabrya 2011 g.)* [Proc. All-Russian with international participation scientific and practical seminar "High-performance technologies for design, engineering and technological preparation and manufacture of aircraft" (Irkutsk, November 9-11, 2011)]. Irkutsk, Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2011, pp. 55-63 (in Russ.).

12. Potapov M.S., Vinogradov D.V. [Overview of milling cutters with a curved cutting edge]. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 11, pp. 21-33 (in Russ.).

13. Dai Bing, Yu Guang-bin, GuanYan-qi, ShaoJun-peng, Wu Xue-mei, Liu Yu-xin. Machining Surface Quality Analysis of Aluminum Alloy Thin-Walled Parts in Aerospace. *International Journal of Security and Its Applications*, 2015, vol. 9, pp. 201-208.

14. Sridhar G., Babu P.R. Understanding the challenges in machining thin walled thin floored Avionics components. *Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 2013, vol. 2, pp. 93-100.

15. Averkhenkov A.V. [Automation of the selection of strategies for processing the design and technological elements of parts in the technological preparation of the production of products]. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 76-80 (in Russ.).

16. Krasilnikova V.A., Kugultinov S.D. *Vybor strategii obrabotki rezaniem slozhnykh poverkhnostei v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya* [The choice of machining strategies for cutting complex surfaces in a computer-aided design system]. *Materials of the International (correspondence) scientific-practical conference "Voprosy nauki i obrazovaniya: Teoreticheskie aspekty"* [Proc. International (correspondence) scientific-practical conference "Questions of science and education: Theoretical aspects"]. Neftkamsk, Mir nauki Publ., 2017, pp. 116-121 (in Russ.).

17. Goroshkin A.K. *Prisposobleniya dlya metallo-rezhushchikh stankov* [Devices for metal-cutting ma-

chine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 303 p. (in Russ.).

18. Vardashkin B.N., Danilevsky V.V. (eds.). *Stanochnye prispособleniya* [Machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, vol. 1, 592 p. (in Russ.).

### Use of Support Modules to Ensure the Accuracy of Non-Rigid Parts of a Complex Profile During Milling

S.A. Pogudin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

N.S. Sivtsev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.G. Bazhin, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The variable nature of the cutting force and the flexibility of the machine-tool-adaptation-tool-part system cause uneven elastic deformations of the workpiece, which constitute a significant part of the error of the blade processing. To increase the accuracy of parts, it is necessary to control the elastic deformations of the workpiece. The fulfillment of this requirement is especially significant in the processing of non-rigid (thin-walled) parts.*

*The systematization of methods for controlling elastic deformations of such parts - stabilizing and reducing the value of elastic deformations - is given. It is shown that the largest number of methods is developed for reducing the elastic deformation of the workpiece during cutting. This is achieved either by reducing the cutting forces, or by increasing the rigidity of the workpiece by methods referred to the group of "sacrificial" and supporting.*

*The results of experimental studies of the accuracy of machining of non-rigid parts by milling using the support module - a block of several movable supports that impede the elastic deformation of the workpiece during processing are presented. It is established that the shape deviation of the surfaces of the parts machined using the auxiliary support module is significantly affected by the location of the supports. In sections of the workpiece remote from the cutting tool, due to elastic deformation, it may detach from the supports, which leads to additional vibrations of the workpiece and a decrease in surface quality according to roughness parameters.*

*To eliminate the gap, a new method for fixing non-rigid blanks on supports and a device for its implementation are proposed. The method includes basing and securing a workpiece, bringing a block of movable supports to its supporting surface and then applying uniformly distributed pressure to the workpiece from the side of the work surface. The device for fixing non-rigid workpieces of the proposed method contains a two-dimensional array of self-aligning supports, rigidly fixed in the appropriate position by the locking mechanism. Some of the supports are equipped with vacuum suction cups mounted on their upper ends and connected with a vacuum system.*

**Keywords:** accuracy, non-rigid parts, milling, cutting forces, elastic deformations, support module.

Получено 14.11.2019

#### Образец цитирования

Погудин С. А., Сивцев Н. С., Бажин А. Г. Применение опорных модулей для обеспечения точности нежестких деталей сложного профиля при фрезеровании // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 27–37. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-27-37.

#### For Citation

Pogudin S.A., Sivtsev N.S., Bazhin A.G. [Use of Support Modules to Ensure the Accuracy of Non-Rigid Parts of a Complex Profile During Milling]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 27-37 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-27-37.