

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВНЕДРЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ТОЧНОСТИ



¹Сергей Павлович Ермаков,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79219779727, E-mail Ermak1999@live.ru.



²Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru

Аннотация

В работе рассматриваются разработка методика оценки надежности внедряемых в производство ТП по обеспечению заданной точности и сформированный на ее основе алгоритм точностной оценки действующих ТП. Проведена их апробация на примере заводских технологических процессов, которая подтвердила адекватность предлагаемой методики и работоспособность созданного алгоритма, а также позволила выявить недостатки этих технологий и ошибки, допущенные технологом, в частности, при разработке технологии изготовления призматической детали, для устранения которых были даны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: надежность ТП, размерный анализ, параметры точности, алгоритм, методика.

Введение

Механообрабатывающие технологические процессы являются ключевыми элементами в процессе производства изделий различного назначения в приборостроении. Они определяют качество изготовленных деталей, в частности, по точности их параметров [1-4].

Точность параметров деталей зависит от многих факторов, включая качество материалов, инструментов, оборудования и сам ТП, при внедрении которого возможны случаи возникновения брака [1-3]. Поэтому в рамках данных технологий важно уделять особое внимание не только производительности, качеству изделий и оптимизации параметров обработки [5-14], но и надежности технологических процессов, поскольку от этого зависит их эффективность и рентабельность.

Таким образом, одним из важнейших аспектов обеспечения точности механообрабатывающих техпроцессов является их надежность по гарантированному достижению параметров заданной конструктором точности размеров и требований взаимного расположения обработанных поверхностей без брака, которую можно оценить по результатам их размерно-точностного анализа.

Согласно [1], под надежностью ТП механической обработки заготовок понимается их свойство обеспечивать точность и качество деталей, заданные чертежом, на разных этапах их изготовления, при условии сохранения на этих этапах требуемых технических параметров в установленных пределах, с учетом обработки заготовок в определенной последовательности, на выбранном оборудовании, в требуемой технологической оснастке, необходимым инструментом и при заданных режимах обработки. При этом надежность ТП можно выразить показателем запаса точности ($\psi = IT_{Xi} / \omega_{Xi}$). Он характеризует отношение допустимой величины изменения (IT_{Xi}) точностного параметра (X_i) к его погрешности (ω_{Xi}), ожидаемой при реализации ТП. Иными словами, надежность ТП, согласно [3], можно связать с надежностью обеспечения требуемой точности обработки заготовок без брака. При условии $1,0 < \psi \leq 1,2$, а тем более $\psi > 1,2$ надежность ТП по обеспечению точности будет гарантирована. Чем этот показатель больше, тем выше ожидаемая надежность ТП по обеспечению точности (она будет зависеть только от правильности настройки оборудования и технологической оснастки и их технического состояния при реализации ТП в реальных производственных условиях).

Оценить ожидаемую при реализации ТП погрешность точностных параметров ω_{Xi} можно на основе использования методики его размерно-точностного анализа, в которой расчет технологических размеров и их допусков осуществляется методом максимума-минимума при обеспечении точности, соответственно, методом полной взаимозаменяемости [1, 3]. Рассматриваемый метод обеспечения точностной надежности ТП позволяет полностью исключить появление брака изготавливаемых деталей по вине технолога и создает условия для того, чтобы можно было вести обработку заготовок в автоматическом режиме, без предварительной выверки.

В связи с этим разработаны методика и алгоритм оценки надежности

внедряемых в производство ТП по параметрам точности (точностной надежности ТП), для которых необходимо строить соответствующие размерные схемы. Проведена их апробация на примере заводских ТП, которая подтвердила адекватность предлагаемой методики и работоспособность созданного алгоритма, а также позволила выявить недостатки этих технологий и ошибки проектирования, допущенные технологом при разработке технологии изготовления призматической детали, для устранения которых были даны соответствующие рекомендации. Однако проведение технологами размерно-точностного анализа ТП сдерживается отсутствием упомянутого выше модуля САД-системы автоматизированного построения размерных схем для его использования в САПР ТП, несмотря на то, что соответствующие расчеты автоматизированы.

Методы

Разработка методики оценки действующих ТП по обеспечению заданной точности

Для эффективного исследования заводских технологических процессов, особенно при изготовлении деталей на станках с ЧПУ [15], необходимо придерживаться некой последовательности действий при их изучении [1, 16-19].

Сперва надо определить, что представляет из себя изучаемая деталь. Она может быть либо телом вращения, либо призматической деталью. Это определяет вариативность предлагаемой методики оценки действующих ТП по обеспечению заданной точности.

Для призматической детали порядок действий исследования, используемого заводского ТП ее изготовления при его точностной оценке, определяющий этапы предлагаемой методики, будет следующим:

1) Построить линейные размерные схемы по исследуемому ТП, как минимум, в трех проекциях [1, 20].

2) Выявить из этих схем размерные цепи, замыкающимися звеньями которых будут являться конструкторские размеры и припуски на обработку, а так же несоосности отверстий, если это необходимо [1].

3) Провести анализ выявленных размерных цепей на предмет количества соответствующих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является конструкторский размер, должно быть не более трех составляющих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является припуск (или несоосность), должно быть не более четырех составляющих технологических размеров [1].

4) При нарушении этих условий или наличии возможности уменьшения количества составляющих технологических размеров изменить

их структуру. Составить новые схемы и повторить 2 и 3 пункты.

5) Провести расчет линейных технологических размеров по схемам до и после их корректировки [1].

6) Проанализировать полученные точности составляющих технологических размеров на предмет излишнего ужесточения их допусков.

Если объект исследования представляет из себя тело вращения, то порядок (этапы) методики точностной оценки ТП его изготовления будет следующим:

1) Построить линейную размерную схему по исследуемому ТП в одной или при необходимости в двух проекциях [1, 20].

2) Выявить из этих схем размерные цепи, замыкающимися звеньями которых будут являться конструкторские размеры и припуски на обработку, а так же несоосности отверстий, если это необходимо [1].

3) Провести анализ выявленных размерных цепей на предмет количества соответствующих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является конструкторский размер, должно быть не более трех составляющих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является припуск (или несоосность), должно быть не более четырех составляющих технологических размеров [1].

4) При нарушении этих условий или наличии возможности уменьшения количества составляющих технологических размеров изменить их структуру. Составить новые схемы и повторить 2 и 3 пункты.

5) Провести расчет линейных технологических размеров по схемам до и после их корректировки [1].

6) Проанализировать полученные точности составляющих технологических размеров на предмет излишнего ужесточения их допусков.

7) Построить схему биений по исследуемому ТП [1, 17].

8) Составить уравнения для расчета биений поверхностей, возникающих в ходе ТП [1, 17, 20].

9) Провести расчет биений и проверку возможности обеспечения требований взаимного расположения поверхностей, заданных в чертеже [1, 21].

10) Проанализировать полученные данные на предмет нерационального закрепления заготовки или назначения переходов.

Разработка общего алгоритма точностной оценки ТП

Общий алгоритм точностной оценки действующих ТП представлен на рис. 1 и включает в себя 2 основные ветки, которые следуют за блоком с определением, к какому типу относится деталь, ТП изготовления которой исследуется.

Первая основная ветка относится к точностной оценке ТП изготовления деталей типа тел вращения (выход из логического блока по ответу «да»).

В этом случае алгоритм предусматривает сначала выполнение подпроцесса с необходимыми действиями для анализа исследуемого ТП по параметрам точности линейных размеров. При этом необходимо построить линейную размерную схему [1, 20], выявить из нее размерные цепи [1], замыкающими звеньями которых будут являться конструкторские размеры и припуски на обработку, а так же несоосности отверстий, если это необходимо, провести анализ размерных цепей на предмет рационального количества составляющих технологических размеров в них, провести анализ точности этих технологических размеров и определить расчетом размерных цепей возможность обеспечения заданных допусков конструкторских размеров на основе технологических размеров [1], указанных в операционных эскизах исследуемого ТП.

В случае если действующий ТП не обеспечивает точность конструкторских размеров, то делается вывод, в котором фиксируется невозможность автоматического обеспечения заданных допусков конструкторских размеров и констатируется необходимость внесения изменений либо в структуру технологических размеров, либо в структуру самого ТП, проводимых в соответствующем блоке подпроцесса, выполняемого в первой ветке общего алгоритма.

Иначе идет блок с сообщением, в котором фиксируется рациональная структура технологических размеров ТП и его способность обеспечить требуемую точность конструкторских размеров автоматически.

Далее идет блок подпроцесса, связанного с выполнением следующих действий: построить схему биений; выявить из нее уравнения для расчета биений; провести их расчет и определить возможность обеспечения точности заданных требований взаимного расположения поверхностей, исходя из информации, представленной в исследуемом ТП.

В случае если ТВР не обеспечиваются по действующему ТП, следует блок подпроцесса, в котором предлагается произвести ужесточение допусков базовых поверхностей, либо повысить класс точности используемых приспособлений для закрепления заготовки, либо изменить их тип, либо изменить структуру самого ТП.

Если же ТВР обеспечиваются по действующему ТП, то по алгоритму осуществляется переход к блоку с сообщением о том, что действующий ТП обеспечивает точность заданных ТВР в автоматическом режиме.

После прохождения всей первой ветки алгоритм завершает свою работу.

Вторая основная ветка алгоритма относится к точностной оценке ТП изготовления призматических деталей (выход из логического блока по ответу «нет»).

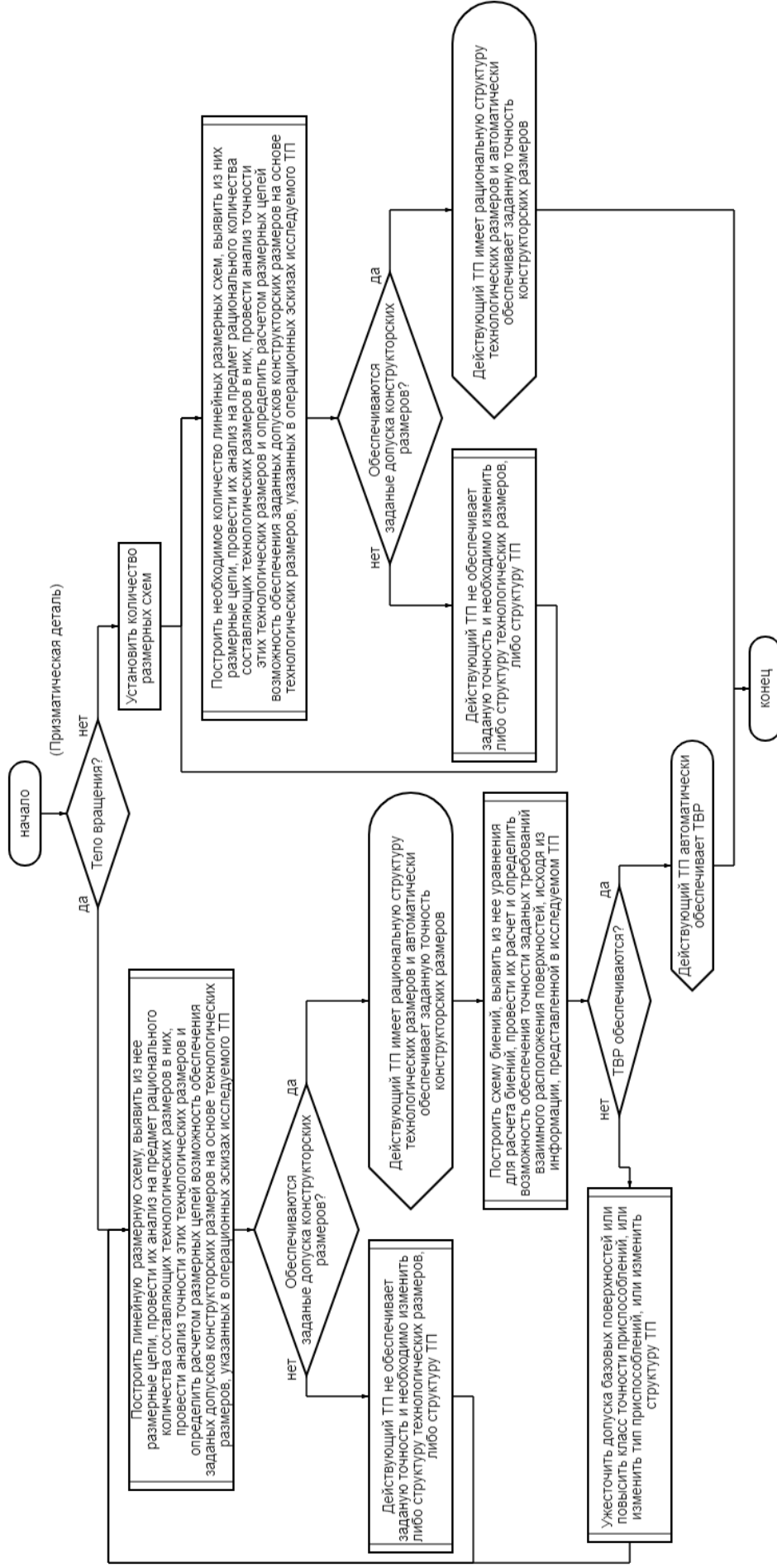


Рис. 1. Общий алгоритм точностной оценки ТП

В этом случае идет переход к блоку с определением количества необходимых размерных схем. Для призматических деталей таких схем должно быть, как минимум три.

После этого алгоритмом предусмотрено выполнение подпроцесса с необходимыми действиями для анализа исследуемого ТП по параметрам точности линейных размеров. При этом следует построить необходимое количество линейных размерных схем, выявить из них размерные цепи, провести их анализ на предмет рационального количества составляющих технологических размеров в них, провести анализ точности этих технологических размеров и определить расчетом размерных цепей возможность обеспечения заданных допусков конструкторских размеров на основе технологических размеров, указанных в операционных эскизах исследуемого ТП.

В случае если действующий ТП не обеспечивает точность конструкторских размеров, то делается вывод, в котором фиксируется невозможность автоматического обеспечения заданных допусков конструкторских размеров и констатируется необходимость внесения изменений либо в структуру технологических размеров, либо в структуру самого ТП, проводимых в соответствующем блоке подпроцесса, выполняемого во второй ветке общего алгоритма.

Иначе идет блок с сообщением, в котором фиксируется рациональная структура технологических размеров ТП и его способность обеспечить требуемую точность конструкторских размеров автоматически.

После этого алгоритм завершает свою работу.

Результаты

Апробация методики и алгоритма на примере ТП изготовления призматической детали

В качестве объекта для апробации разработанной методики и построенного на ее базе алгоритма был выбран ТП изготовления детали «Фланец», которая относится к деталям призматического типа и является высокоответственной деталью, входящей в сборку топливной системы двигателя «ВК-2500».

Данная деталь изготавливается из алюминиевого сплава АК4-1. Заготовку для изготавливаемой детали получают методом литья под давлением. В конечном виде заготовка является призматической высотой 30 мм с двумя параллельными плоскостями, которые расположены на расстоянии 60 мм друг от друга, и двумя боковыми сторонами, вписывающимися в круг Ø125 мм. Деталь представляет из себя фланец сложной конфигурации с 8 отверстиями и внутренними сквозными окнами.

В ходе изучения технологии изготовления представленной детали

были выявлены места обработки с периодически возникающим браком по параметрам точности. К таким местам относится внешний контур и выступающая поверхность.

В начальный момент анализа существующей на производстве технологии причины возникновения брака не были установлены, что потребовало более подробного ее изучения. По предварительной оценке, первопричиной появления брака может служить ошибка технолога при составлении ТП. Появление брака носит не постоянный характер, детали получают либо на грани допуска, либо с неисправимым браком.

При проведении размерно-точностного анализа действующего ТП изготовления детали «Фланец» был использован разработанный алгоритм. В соответствии с ним и с учетом технологических размеров, указанных в операционных эскизах, было построено пять схем линейных размеров. На основе этих схем были выявлены технологические размерные цепи, замыкающими звеньями которых являются конструкторские размеры и припуски на обработку, а составляющими звеньями – технологические размеры.

В ходе исследования составленных размерных схем были выявлены ошибки и нецелесообразные решения технолога, допущенные и принятые им при разработке ТП.

Расчет размерных цепей был проведен с использованием программы, работающей в среде MS Excel. Программа расчета линейных размеров разработана на факультете систем управления и робототехники Университета ИТМО на основе общих положений, приведенных в методике, описанной в [1], а также справочной информации. Сам расчет линейных размеров в программе проводится на max-min по методу полной взаимозаменяемости [1, 3], который исключает появление брака.

Пример результатов программногo расчета, выполненного при условии автоматического обеспечения заданной точности конструкторских размеров с использованием выверки заготовки на фрезерных операциях в автоматическом режиме при помощи специального шупа, представлен на рис. 2. В целом полученные результаты расчета показали, что в действующем ТП неправильно назначены допуски на некоторые технологические размеры, которые потребовалось ужесточить до 10 качества, а в некоторых случаях имела место быть нерациональная структура технологических размеров.

После изменения структуры технологических размеров и ужесточения их допусков, в соответствии с разработанным алгоритмом, на экран выводится сообщение: «Действующий ТП имеет рациональную структуру технологических размеров и автоматически обеспечивает заданную точность конструкторских размеров», что свидетельствует о правильности структуры как самого ТП, так и назначенных технологических размеров, а также их принятых допусков. Но стоит помнить, что результаты расчета

только по одной схеме не гарантируют обеспечения точности конструкторских размеров по всему ТП и для полной оценки был проведен анализ оставшихся схем.

Величины конструкторских размеров, припусков и несоосностей			№ черт.: 7885.0471 № размерной схемы: 2 наим. дет.: Фланец		Величины расчетных технологических размеров			ВО - верхнее отклонение, НО - нижнее отклонение	
№ п.п.	Обознач. и № звена	Номинал	+/- Знач. ВО /-+ Знач. НО	Информационное сообщение	Обознач. и № технол. р-ра	Номинал	+/- Знач. ВО /-+ Знач. НО	Информационное сообщение	
1	К 1 =	2	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К1 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 1 =	14	0,05 -0,05	Номинальное значение технологического размера Т1 и его отклонений рассчитаны и приняты	
2	К 2 =	5,5	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К2 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 2 =	0,5	0,05 -0,05	Номинальное значение технологического размера Т2 и его отклонений рассчитаны и приняты	
3	К 3 =	6,5	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К3 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 3 =	2	0,1 -0,1	Номинальное значение технологического размера Т3 и его отклонений рассчитаны и приняты	
4	К 4 =	6	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К4 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 4 =	7,5	0,01 -0,01	Номинальное значение технологического размера Т4 и его отклонений рассчитаны и приняты	
5	К 5 =	6,5	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К5 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 5 =	14	0,1 -0,1	Номинальное значение технологического размера Т5 и его отклонений рассчитаны и приняты	
6	К 6 =	9	+ 0,25 -0,25	Номинальное значение размера К6 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 6 =	9	0,25 -0,25	Номинальное значение технологического размера Т6 и его отклонений рассчитаны и приняты	

Рис. 2. Пример результатов расчета технологических размеров по схеме №2 для действующего ТП изготовления детали «Фланец» с учетом принятых корректировок

Таким образом, был сделан вывод, что по действующему ТП возможно появление брака из-за ошибок, допущенных технологом при составлении ТП. В связи с чем требуется провести изменение структуры ТП с корректировкой базирования заготовки на фрезерных операциях. Новая структура ТП должна исключать настроечные базы, чтобы автоматически обеспечить точность конструкторских размеров и отказаться от использования измерительного шупа при определении нуля каждой обрабатываемой заготовки на операциях с ЧПУ.

Обсуждение

Кроме предложенной методики оценки точностной надежности внедряемых в производство технологий на основе проведения их размерно-точностного анализа и разработанного алгоритма ее использования необходимо в дальнейшем создать модуль САД-системы для автоматизированного построения размерных схем механообрабатывающих ТП [20], т.е. разработать соответствующий программный инструментарий, который после его объединения с уже имеющимся блоком размерных расчетов предоставит технологу реальную возможность проведения оценки точностной надежности механообрабатывающих ТП для внедрения их в производство с наименьшими затратами, связанными с устранением или исключением причин возникновения брака по параметрам точности изготовления деталей [1].

Результаты данной работы будут важны для предприятий, занимающихся производством деталей различного типа, что определяет их практическую значимость. Разработанные методика и алгоритм позволят повысить точностные параметры изготавливаемых деталей, что, в свою

очередь, улучшит качество и надежность конечного продукта, а также увеличит конкурентоспособность предприятия на рынке.

Заключение

Таким образом, благодаря автоматизированному созданию размерных схем, моделированию и анализу, инженеры-технологи смогут быстрее создавать и проверять различные концепции и варианты маршрута обработки заготовок, способов их закрепления и базирования в приспособлениях и на станках. Также такой модуль в совокупности с уже автоматизированными расчетами позволит выявить потенциальные проблемы и ошибки, возникающие на операциях ТП, еще на ранних стадиях проектирования, что позволит снизить количество дорогостоящих исправлений, вносимых в технологию, на более поздних этапах производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Валетов В.А. Технология приборостроения. Учеб. пособие / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
- [2] Наумова А.Н. Причины возникновения брака продукции на машиностроительном предприятии и пути его сокращения // САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия – 2020. – Т. 12. – №. 1.
- [3] Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
- [4] Халимоненко А.Д. Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами / А.Д. Халимоненко, Р.В. Вьюшин // Записки горного института, 2014. Т. 209. С. 99-103.
- [5] Кранаренков Ю.Б. Повышение точности и производительности многолезвовой токарной обработки / Ю.Б. Кранаренков, С.А. Атаманов, Е.А. Шаев // Станки и инструменты. – № 8, 1974. – С. 28-30.
- [6] Шаш Н.Н. Управление качеством на предприятии (малый бизнес) / Н.Н. Шаш, А.В. Касьянов. Под редакцией А.В. Касьянова // М.: ГроссМедиа, 2014. – С.80-85.
- [7] Timofeev D.Y., Kosheleva E.V. Improving the quality of manufacturing parts from titanium alloys using the method of preliminary local plastic deformation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2017, Vol. 87, Iss. 8, 082048.
- [8] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, Key Engineering Materials, 2017, Vol. 736, pp. 86-90.

- [9] Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Stepanov Y.S., Khizhnyak N.A. Improving Cutter Performance in Turning Complex Profiles, Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, Iss. 12, pp. 1003-1008.
- [10] Астахов С.А. Деформации обрабатываемой полой цилиндрической заготовки / Известия ТулГУ, Серия «Технические науки», 2011, 4 вып., с. 307-315.
- [11] Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process, 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327(4) 042069.
- [12] Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365-389.
- [13] Yuan M., Wang, M. A feature selection method based on an improved fruit fly optimization algorithm in the process of numerical control milling, Advances in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 10, Iss. 5.
- [14] Астахов С.А., Сидоркин А.В., Маликов А.А. Экспериментальное определение жесткости технологической системы и ее влияние на точность обработки / Известия ТулГУ, Серия «Технические науки», 2011, 4 вып., с. 302-306.
- [15] Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. – 2015.
- [16] Клевцов В.А., Помпеев К.П. Автоматизация процесса проектирования технологий на основе структурного синтеза размерных связей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2014. – Т. 57. – № 8. – С. 37-40.
- [17] Помпеев К.П. Особенности размерно-точностного анализа технологий изготовления валов в центрах // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. / под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 1049-1058
- [18] Белашов В.А., Белашов А.В., Белашов М.В. Размерный анализ технологий в редакторе технологических процессов: Методическое пособие. – Пенза: Пензенский гос. университет, 2008. – 49 с.
- [19] Shao X.Y., Lin K., Gao L., Qiu H.B. «Research on Tolerance Analysis System Based on 3D Collaborative Design Platform»/ Scientific.Net, Advanced Materials Research, 2028, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, vols/ 44-46, pp 253-260.
- [20] Борботько В.А., Помпеев К.П., Плешков А.А. Интерактивный синтез технологических размерных схем// Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 9-й Международной научно-практической конференции. / под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 1049-1058

- [21] Борботько В.А., Помпеев К.П. Совершенствование методики расчета промежуточных диаметральных размеров // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО – 2019. – Т. 2. – С. 50-52.

S.P. Ermakov, K.P. Pompeev

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF TECHNOLOGIES INTRODUCED INTO PRODUCTION BY ACCURACY PARAMETERS

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper discusses the development of a methodology for assessing the reliability of TPs introduced into production to ensure a given accuracy and, based on it, an algorithm for the accuracy assessment of existing TPs. They were tested using the example of factory technological processes, which confirmed the adequacy of the proposed methodology and the operability of the created algorithm, and also made it possible to identify the shortcomings of these technologies and errors made by the technologist, in particular, when developing the technology for manufacturing a prismatic part, for which appropriate recommendations were given.

Key words: TP reliability, dimensional analysis, accuracy parameters, algorithm, methodology.

REFERENCES

- [1] Valetov V.A. Technology of instrument making: study guide / V.A. Valetov, K.P. Pompeev. – SPb.: NRU ITMO, 2013. – 234 p. (rus.)
- [2] Naumova A.N. Reasons for product defects at a machinery engineering enterprise and ways to reduce it // NArFU named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia – 2020. – Vol. 12. – No. 1. (rus.)
- [3] Matalin A.A. Technology of mechanical engineering: textbook for high schools. SPb.: Lan, 2010. – 512 p. (rus.)
- [4] Khalimonenko A.D. The accuracy of processing when turning blanks with a cutting tool equipped with replaceable ceramic plates / A.D. Khalimonenko, R.V. Vyushin // Notes of the Mining Institute, 2014. V. 209. Pp. 99-103. (rus.)
- [5] Kranarenkov Yu.B. Increasing the accuracy and productivity of multi-cutter turning / Yu.B. Kranarenkov, S.A. Atamanov, E.A. Shaev // Machine tools and tools. – No. 8, 1974. – Pp. 28-30. (rus.)

- [6] Shash N.N. Quality management at an enterprise (small business) / N.N. Shash, A.V. Kasyanov. Edited by A.V. Kasyanova // M.: GrossMedia, 2014. – Pp.80-85. (rus.)
- [7] Timofeev D.Yu., Kosheleva E.V. Improving the quality of manufacturing parts from titanium alloys using the method of preliminary local plastic deformation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2017, Vol. 87, Iss. 8, 082048. (rus.)
- [8] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, Key Engineering Materials, 2017, Vol. 736, pp. 86-90 (rus.)
- [9] Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Stepanov Y.S., Khizhnyak N.A. Improving Cutter Performance in Turning Complex Profiles, Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, Iss. 12, pp. 1003-1008.
- [10] Astakhov S.A. Deformations of a processed hollow cylindrical workpiece / News of Tula State University, Series «Technical Sciences», 2011, Iss. 4, pp. 307-315. (rus.)
- [11] Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process, 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327(4) 042069.
- [12] Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365-389.
- [13] Yuan M., Wang, M. A feature selection method based on an improved fruit fly optimization algorithm in the process of numerical control milling, Advances in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 10, Iss. 5.
- [14] Astakhov S.A., Sidorkin A.B., Malikov A.A. Experimental determination of the rigidity of a technological system and its influence on processing accuracy / News of Tula State University, Series «Technical Sciences», 2011, 4 issues, p. 302-306. (rus.)
- [15] Balla O. M. Processing of parts on CNC machines. Equipment. Equipment. Technology. – 2015. (rus.)
- [16] Klevtsov V.A., Pompeev K.P. Automation of the technology design process based on structural synthesis of dimensional connections // News of higher educational institutions. Instrument making – 2014. – Vol. 57. – No. 8. – Pp. 37-40. (rus.)
- [17] Pompeev K.P. Specifics of precision dimensional analysis of shafts making technologies in bench centers // Modern machine building: Science and Education : materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. / Ed. M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. – SPb.: Publishing house of Polytechnic Univ., 2014. – Pp. 1049-1058. (rus.)
- [18] Belashov V.A., Belashov A.V., Belashov M.V. Dimensional analysis of technologies in the technological process editor: Methodological manual. – Penza: Penza State. University, 2008. – 49 p. (rus.)

- [19] Shao X.Y., Lin K., Gao L., Qiu H.B. «Research on Tolerance Analysis System Based on 3D Collaborative Design Platform» / Scientific.Net, Advanced Materials Research, 2028, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, vols 44-46, pp. 253-260.
- [20] Borbotko V.A., Pompeev K.P., Pleshkov A.A. Interactive synthesis of technological dimensional schemes // Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the 9th International Scientific and Practical Conference. / Ed. MM. Radkevich and A.N. Evgrafov. – SPb.: Polytechnic Publishing House. Univ., 2020. – pp. 1049-1058. (rus.)
- [21] Borbotko V.A., Pompeev K.P. Improving the methodology for calculating intermediate diametral dimensions // Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University – 2019. – Vol. 2. – Pp. 50-52. (rus.)