

## **ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Развитие прецизионных производств в ближайшее время станет одним из основных факторов, определяющих конкурентоспособность национальных экономик. Современный объем рынка прецизионной и ультрапрецизионной техники и оборудования для ее производства составляет более 750 млрд. долларов и имеет тенденции для дальнейшего роста [1].

Ведущие промышленные государства рассматривают развитие прецизионных технологий как элемент долговременного доминирования при переходе к новой структуре промышленного производства [2].

Разрабатывается не только принципиально новое оборудование, но и методы его согласованного использования в составе единых автоматизированных производств. Ставятся задачи инструментального обеспечения качества прецизионной деталей с исключением ручных работ.

В этих условиях задача сохранения конкурентоспособности отечественных предприятий прецизионного машиностроения становится остро актуальной. Ее решение требует проведения реинжиниринга существующих производств. Стратегии приобретения зарубежных технологий для этого имеют ограниченную эффективность, потому что не учитывают структуру отечественных технологических систем.

Одним из элементов решения данной задачи должен быть анализ современных трендов развития прецизионного производства для четкого определения целей и принципов проводимого реинжиниринга. Проведение такого анализа являлось целью настоящей работы.

### **Роль прецизионного производства в обеспечении конкурентоспособности**

В зарубежных исследованиях превалирует технократический подход к определению причин ускоренного развития прецизионного производства. Так в работе McKeown [3] причины непрерывного повышения точности обработки связаны со следующими требованиями:

- устранение подгонки при сборке;
- улучшение взаимозаменяемости;
- упрощение контроля качества за счет использования возможностей оборудования;
- повышение ресурса механизмов;
- стремление к миниатюризации;
- стремление к дальнейшему прогрессу в области науки и техники.

Покажем, что такие факторы являются вторичными и возникают вследствие действия фундаментальных процессов природного, экономического и социального характера.

В первую очередь к таким процессам следует отнести рост стоимости всех видов сырьевых ресурсов, связанный с интенсивной выработкой известных на сегодняшний день их природных запасов.

В таблице 1 приведены некоторые данные о прогнозах исчерпания критически важных для современного производства материалов, приведенных в работе Ragnarsdóttir [4]. Время "выгорания" ресурса определялось как отношение величины разведанных запасов к объему годовой добычи, а время выработки по Hubbert учитывало экспоненциальный характер уменьшения выработки при уменьшении объема ресурса [5].

Таблица 1 – Прогнозы исчерпания важных для производства металлов

Элемент	Время "выгорания", лет	Время выработки, лет	Известные запасы на 2008 г., млн. т.	Добыча на 2008 г., млн. т.	Рециклинг, %
Железо	79	176	150000	1900	20
Алюминий	132	286	25000	190	30
Медь	31	71	490	15,6	50
Никель	42	95	67	1,6	50
Магний	19	78	300	8,8	20
Цинк	20	38	180	10,5	10
Вольфрам	32	74	2,9	0,9	20
Хром	86	100	18	0,21	25
Молибден	48	120	8,6	0,18	25

Авторы работы [4] справедливо отмечают, что результаты сделанного ими прогноза необходимо уточнить. Однако вне зависимости от количественных данных, качественный результат прогноза окажется неизменным – при сохранении современных тенденций в потреблении ресурсов цивилизация в обозримом будущем столкнется с серьезнейшим кризисом. Ее устойчивость может поддержать только снижение потребления ресурсов с одновременным резким повышением доли их рециклинга.

Развитие прецизионных технологий непосредственно связано с влиянием ресурсного фактора. Так, например, рост точности обработки в производстве двигателей и топливной аппаратуры был непосредственно связан с задачей повышения топливной эффективности, которая стала серьезно рассматриваться после нефтяного кризиса в 70-х годов двадцатого века. С влиянием этого фактора можно связать также

отмеченное McKeown [3] стремление к повышению ресурса деталей и миниатюризации механизмов.

В наибольшей степени требования снижения потребления ресурсов могут быть достигнуты за счет применения аддитивных технологий - нового, бурно развивающегося направления прецизионного производства, основанного на изменении способа получения детали с удаления на добавление материала. Такие технологии, первоначально применявшиеся для быстрого прототипирования, в настоящее время достигли уровня, позволяющего производить сложные конструктивные элементы для авиационных двигателей, мехатронных систем и др. [2, 6, 7]. Ожидается, что применение таких технологий в авиастроении позволит изменить коэффициент *by-to-fly* (приобретенный и летающий материал) с современных 10...15 до 1,5...2 [2].

С точки зрения движителей социального характера, стимулирующих ускоренное развитие прецизионных технологий, следует выделить стремление к повышению качества жизни. Это порождает комплекс задач, исходящих от осознания необходимости противостоять деградации окружающей среды, стремления к продлению активного периода жизни населения, развития систем массовых коммуникаций.

Развитие прецизионных технологий в этих областях, непосредственно связанных с потребителем, идет особенно быстро. Согласно данным обзора [1], именно медицина, возобновляемые источники энергии и технологии защиты окружающей среды в ближайшем будущем будут основными движителями развития прецизионных технологий.

Экономические факторы, стимулирующие развитие прецизионного производства, связаны с попытками изменения сложившейся в мире конкурентной ситуации. Основными центрами, развивающими прецизионные технологии, являются США, где по состоянию на 2010 год эксплуатировалось 43% мирового аддитивного оборудования, ЕС (более 30%) и страны азиатско-тихоокеанского региона (23%), из которых доля Японии составила 10% [8].

Такое положение является результатом реализации государственных стратегий реиндустриализации для возврата производства в "старые" промышленные центры, проигрывающие в конкурентной борьбе в области производства на основе традиционных технологий.

Целью реализации таких стратегий заявляется возврат лидерства в производстве, однако в производстве нового типа – с минимальными затратами ресурсов, энергии, практически безотходного, не требующего большого количества рабочей силы, базирующегося на лидерстве в исследованиях и подготовке кадров [2,6].

Отсюда следуют приоритеты в развитии автоматического производства, включая сборку и, как следствие, отмеченное McKeown в качестве причины повышения точности, стремление к устранению подгонки [3].

Наконец, отметим ключевой экономический аргумент, стимулирующий острую конкурентную борьбу в области прецизионного производства, – огромный и быстро увеличивающийся объем рынка.

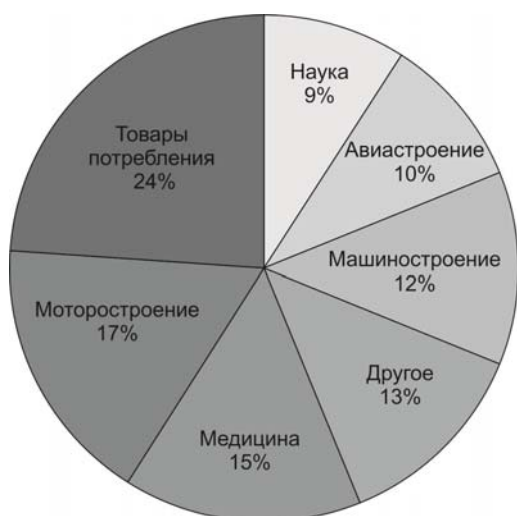


Рисунок 1 – Потребители 3D принтеров на 2011 г. [8]

Так, например, объем продаж 3D принтеров в 2011 году составлял 1.7 млрд. долларов, а в 2012 – уже 2.2 млрд. Объем рынка в этом сегменте аддитивного оборудования с 2008 по 2012 год вырос на 346% [8]. При этом существенную роль в структуре потребления данного оборудования играли промышленные отрасли (рис. 1).

Разумеется, нельзя недооценивать последний из факторов, отмечавшийся McKeown в качестве причины развития прецизионной обработки, – стремление к прогрессу в области науки и техники [3]. Однако само по себе стремление к творческому выражению, свойственное человеку, не подкрепленное сформировавшейся общественной потребностью, не способно быть устойчивым двигателем развития. Подтверждением этому является судьба многочисленных идей, опередивших свое время.

Таким образом, тенденция ускоренного развития прецизионного производства будет сохраняться, поскольку она вызвана объективными причинами глобального характера. Многочисленные аналитические исследования показывают, что этот процесс может привести к серьезным изменениям в характере, структуре и размещении промышленного производства и в ближайшем будущем будет определять конкурентоспособность национальных экономик.

**Тренды развития прецизионного производства**

Одним из основных трендов развития машиностроения в двадцатом веке было улучшение точности изготовления деталей. Эта тенденция количественно была впервые описана в работах Taniguchi [3, 9]. Taniguchi разделил все процессы размерной обработки на обычную, прецизионную и ультрапрецизионную обработку. Его графики, описывающие изменение точности этих видов обработки со временем (рис. 2), впоследствии приводились практически во всех аналитических статьях, посвященных прогнозированию развития высокоточных технологий.

Для целого ряда ключевых изделий, обеспечивающих конкурентоспособность производства, проявляется тенденция смещения технологий обработки на микро- и наноруровень точности [10].

Параллельно с непрерывным повышением точности изготовления происходит процесс миниатюризации высокоточных механизмов. Так,

например, для автомобильной системы АБС, производимой фирмой BOSCH, за 12 лет (с 1989 по 2001 г.) произошло снижение массы в 3,5 раза.

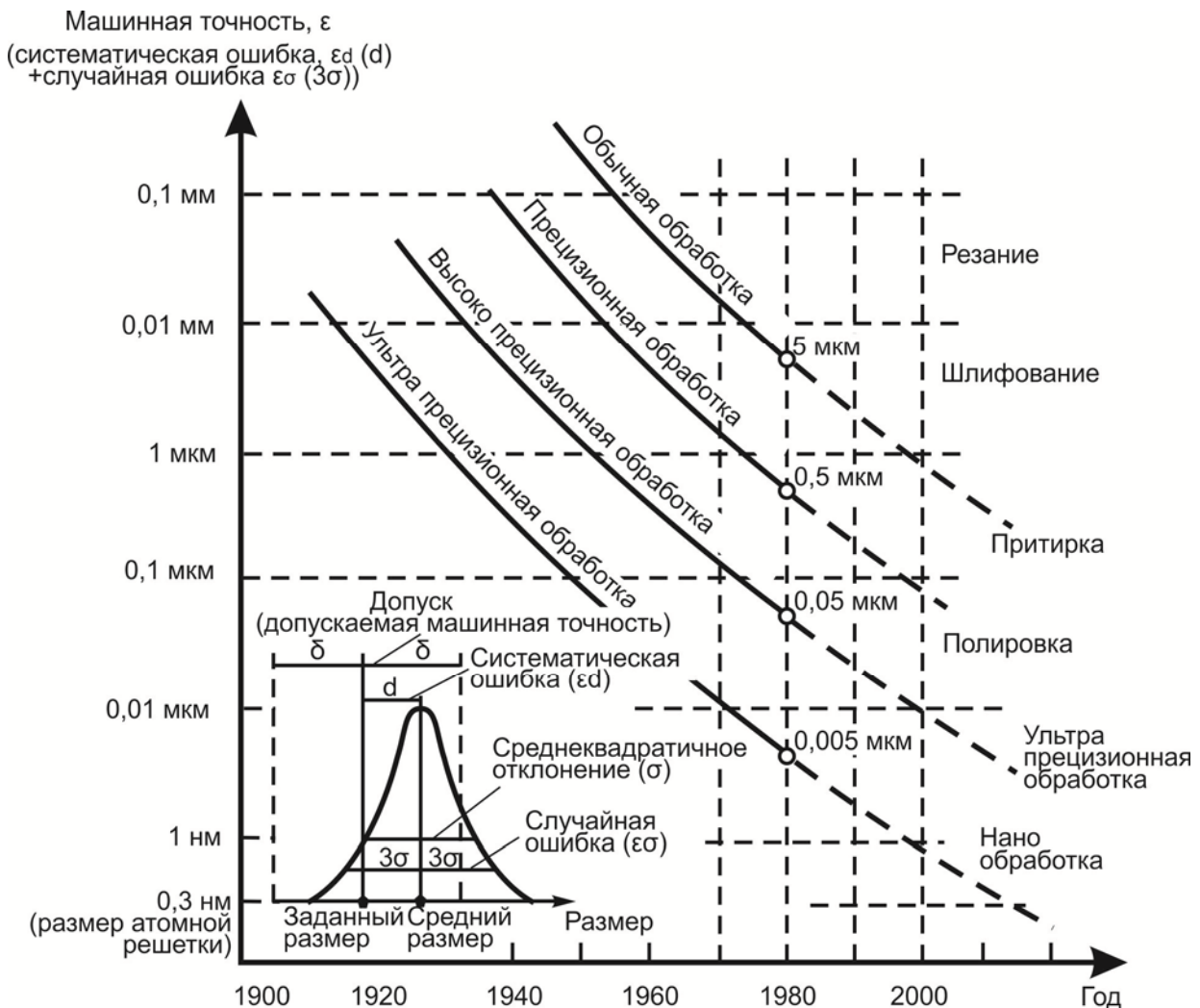


Рисунок 2 – Изменение точности обработки со временем по Taniguchi [3]

Миниатюризация и повышение точности деталей приводят к уменьшению зазоров в прецизионных механизмах. Такие количественные изменения неизбежно приводят к качественным, делая необходимым учет факторов, которые до этого не рассматривались в процессе проектирования и производства.

Это относится, например, к необходимости компенсации температурного дрейфа, поскольку изменения зазоров при неравномерном нагревании, ввиду их малости, может привести к заклиниванию прецизионных пар. Наиболее известным случаем такого рода является серия из 7 катастроф, произошедшая в 1991-1996 г. с самолетами Boeing-737. Как показало расследование, проведенное в 1996 г., аварии были вызваны ситуацией, когда в промёрзший после полета на высоте механизм гидропривода руля направления на посадке поступала гидравлическая жидкость, его заклинивало, что приводило к реверсу управляющего воз-

действия [11].

Еще одним примером такого рода является задача стабилизации геометрических размеров, появившаяся в результате повышения требований по точности изготовления деталей гироскопов. Она связана с необходимостью устранения внутренних напряжений в поверхностном слое деталей. Наиболее перспективным путем ее решения стал переход к бездеформационным процессам формообразования [12].

В таких процессах съём материала происходит за счет физических, химических и комбинированных процессов. К таким процессам относятся технологии, основанные на плавлении, испарении и абляции материала, его химическом растворении или распылении при воздействии интенсивных потоков частиц.

В последнее время появились работы, в которых исследуется возможность применения биологических процессов для обработки поверхностей прецизионных деталей, хотя эти разработки находятся на самой ранней стадии развития.

Общей проблемой процессов микрообработки является их низкая производительность. Это связано с необходимостью уменьшения снимаемого слоя материала для обеспечения заданных параметров (табл. 2). Для повышения производительности применяют комбинированные технологии, с использованием прецизионных процессов на стадиях финишных операций.

Таблица 2 – Диапазон использования и достижимое качество процессов нано-, микро- и макрообработки [13]

Параметры	Нанообработка	Микрообработка	Макрообработка
Размер зоны обработки	1...10 мкм <sup>2</sup>	1...10 мм <sup>2</sup>	1...10 см <sup>2</sup>
Объем, удаляемый за проход	10 <sup>-3</sup> ... 10 <sup>2</sup> мкм <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> ... 10 <sup>2</sup> мм <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> ... 10 <sup>2</sup> см <sup>3</sup>
Скорость съема материала	10 <sup>-5</sup> ... 1мкм <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	10 <sup>-5</sup> ... 1мм <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	10 <sup>-5</sup> ... 1см <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>
Погрешность формы	10 <sup>-5</sup> ... 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-7</sup> ... 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> ... 10 <sup>-3</sup>
Шероховатость поверхности	1...100 Å	1...100 нм	0,1...10 мкм

В работах McKeown сформулированы основные правила проектирования прецизионных механизмов [3, 10]. Использование этих принципов при создании прецизионного оборудования должно обеспечить повторяемость результатов обработки при изменении внешних условий.

Так, например, наличие встроенной система измерений, являющееся одним из правил создания прецизионных механизмов по McKeown,

на сегодняшний день стало обычной опцией обрабатывающих центров. Дальнейшим развитием данного тренда является реализующийся в настоящее время переход к системам непрерывного мониторинга размерной обработки.

Еще одним трендом в области прецизионной обработки является переход к адаптивным технологиям. Этот процесс связан с тем, что явления, происходящие при прецизионной обработке, становятся слишком сложны для анализа. Это делает практически невозможным обработку с заданным уровнем точности при использовании жестких алгоритмов, определенных по результатам математического моделирования.

Общим признаком для всех видов прецизионной размерной обработки на сегодняшний день является применение систем ЧПУ, интегрированных с CAD. Алгоритмы ЧПУ обработки постоянно совершенствуются, обеспечивая все большую точность позиционирования инструмента [13, 14].

Наконец, одним из ключевых элементов прецизионного производства является системное обеспечение требований промышленной чистоты, во многом определяющих такие важнейшие показатели механизмов как ресурс и безотказность.

### **Промышленная чистота прецизионных деталей**

Обработка резанием по-прежнему остается основным способом размерной обработки прецизионных деталей. Однако такая обработка является не только средством обеспечения геометрической точности деталей, но и причиной их искажения, а также источником образования различных ликвидов – заусенцев, плен, микрочастиц.

При обработке резанием происходит искажение формы кромки, образующейся в результате пересечения двух поверхностей. В результате кромка представляет собой сложную кривую с продольной шероховатостью, которая может на порядок превышать шероховатость образующих ее поверхностей (рис. 3) [15].

Повышенная шероховатость кромок существенно снижает их прочность. Выступы микронеровностей на режущих кромках инструмента разрушаются в первые секунды резания. При этом происходит образование наиболее опасных микрочастиц с высокой твердостью.

Профилирование кромки является важным этапом при производстве прецизионных деталей. Например, в проспектах фирмы Extrude Hone приводят-

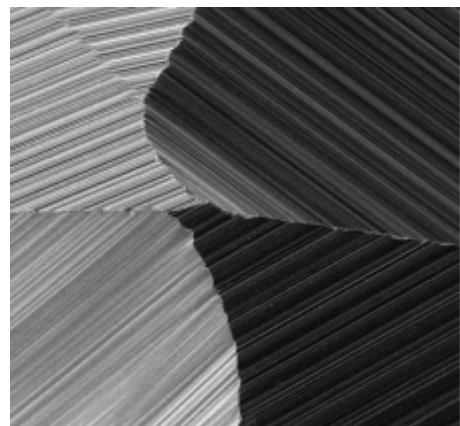


Рисунок 3 – Продольная шероховатость режущих кромок сверла [15]

ся результаты испытаний топливных форсунок с отверстиями без обработки кромок и после их профилирования.

Профилирование отверстия повышает точность обеспечения массового расхода через жиклер с  $\pm 6\%$  до  $\pm 1\%$ , что непосредственно влияет на топливную эффективность двигателя [16]. Дополнительная финишная обработка кромок инструмента (например, магнитоабразивная) выравнивает шероховатость поверхностей и кромок. Одно это позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5 раза.

К сожалению, в отечественной практике вопросы стандартизации профиля кромок практически не рассматривались. В качестве требований к кромкам традиционно применялись два варианта: "острые кромки притупить радиусом" с указанием размера, либо "острые кромки не тупить".

За рубежом эволюция требований к качеству кромок и расширение квалитетических показателей, которые учитывались в стандартах их качества, были непосредственно связаны с тенденциями повышения точности обработки.

Так, например, проектом международного стандарта отделки кромок, разработанным в конце 90-х годов, предусматривалось семь уровней качества финишной отделки кромок [17]. Во всех из них с некоторыми ограничениями допускалось наличие заусенцев на кромках, а допуски на точность геометрических размеров профиля кромки не устанавливались.

Однако уже через 10 лет стандарт качества кромок приобретает существенное изменение. Он включает разделение кромок по типам; количественные диапазоны по размерам и допускам для поперечного профиля кромок; целый ряд квалитетических показателей, которые ранее не рассматривались – допуски на отклонение формы, требования к продольному профилю и к поверхностному слою на кромках [18]. Стандарт вообще не предусматривает возможности наличия заусенцев

на любых классах кромок.

Наиболее жесткие стандарты, регламентирующие качество кромок, разработаны для применения при изготовлении и контроле кромок современного режущего инструмента [19]. Согласно этому стандарту форма поперечного профиля кромки задается углом кромки и дополнительными 4 параметрами:  $\Delta r$ ,  $\varphi$ ,  $S_\alpha$  и  $S_\gamma$  (рис. 4). Параметр  $\varphi$  в полярных координатах, привязанных к системе координат с центром на линии пересечения передней и задней поверхности, задает азимутальное отклонение острия кромки относительно биссектрисы угла кромки в плане. Параметр  $\Delta r$  за-

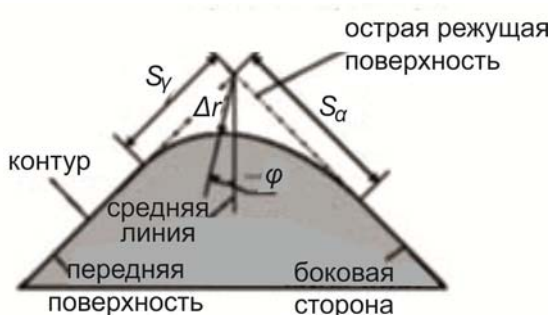


Рисунок 4 – Характеристики режущей кромки [19]

привязанных к системе координат с центром на линии пересечения передней и задней поверхности, задает азимутальное отклонение острия кромки относительно биссектрисы угла кромки в плане. Параметр  $\Delta r$  за-



дает радиальную координату острия кромки, параметры  $S_\gamma$  и  $S_\alpha$  задают размер кромки по передней и задней поверхности соответственно. Сама кривая, описывающая профиль задается по координатам острия и точкам на передней и задней поверхности сплайном.

Образованию микрочастиц при механообработке долгое время не уделялось должного внимания. Активность в этой области существенно возросла с появлением результатов исследований доказавших, что воздействие высоких концентраций ингаляционных металлических частиц может привести к заболеваниям операторов станков [20, 21].

Это вызвало появление целого ряда исследований, в которых изучался вопрос образования микрочастиц при резании. Обзор этих работ приведен в монографии [22]. Была установлена связь интенсивности образования микрочастиц от способа формирования стружки, материала, скорости резания, подачи и формы резца и др.

Khettabi [23] выделил четыре зоны, в которых происходит образование микрочастиц, различающиеся по характеру напряженного состояния. Микрочастицы образуются в них вследствие либо сдвига, либо хрупкого излома стружки.

В области режущей кромки инструмента создается зона, в которой обрабатываемый материал застаивается. В этой зоне генерируются как микрочастицы материала детали, образующиеся из-за интенсивных упругопластических деформаций, так и инструмента, образующиеся в результате его износа.

Требования по чистоте поверхностей прецизионных деталей регламентируются международными стандартами [24]. Согласно которым класс чистоты для каждого конкретного случая устанавливается в зависимости от требований по надежности, ресурсу, условий эксплуатации и стоимости ремонта механизма.

Отечественными стандартами не нормируется количество загрязняющих частиц с размером менее 5 мкм. В то же время, доказано, что основная доля отказов прецизионных механизмов ЛА связана с превышением норм по массовой концентрации, а не по размерам частиц [25]. На рис. 5 показана зависимость наработки на отказ золотниковых агрегатов (кривые 2,4) и гидронасосов ЛА (кривые 1,3). Кривые 1 и 2 соответствуют случаям превышения норм по массовой концентрации частиц меньших 5 мкм; 3, 4 – с концентрацией согласно ГОСТ 17216-2001.

В связи с миниатюризацией прецизионных механизмов, зазоры в контактирующих парах могут иметь микронные размеры. Это приводит к необходимости очистки поверхностей деталей от частиц даже субмикронного размера.

Заметим, что такой вывод противоречит сформировавшемуся в отечественной литературе мнению о том, что наличие частиц, размеры которых меньше величины зазора между деталями пар трения, не оказывает влияния на их ресурс.

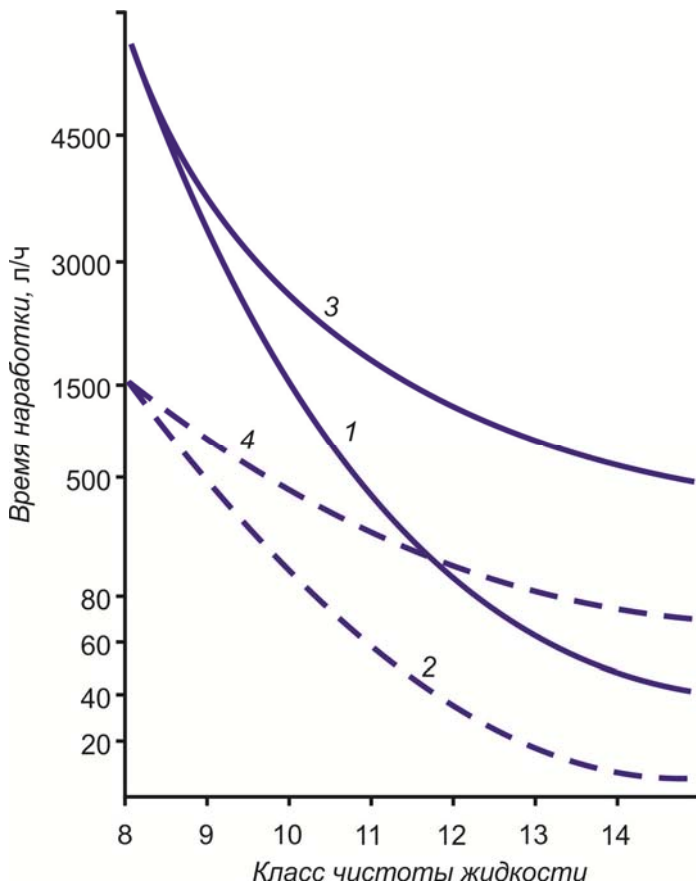


Рисунок 5 – Изменение времени наработки на отказ от класса чистоты жидкостей для прецизионных пар агрегатов гидравлических систем ЛА

ла.

Технологии финишной отделки кромок и очистки поверхностей прецизионных деталей должны удовлетворять ряду специфических требований, связанных с объектом обработки. Большой объем публикаций в этой области не позволяет провести подробный их анализ в рамках настоящей работы. Ввиду важности данной темы, перспективы развития таких технологий будут рассмотрены в отдельной статье.

### **Задачи реинжиниринга отечественных технологических систем прецизионного производства**

Сохранение конкурентоспособности отечественных предприятий прецизионного машиностроения требует изменения траектории их модернизации. Стратегия следования за лидером для решения этой задачи не является лучшим выбором. Это связано с различием в структуре отечественного и зарубежного прецизионного производства.

Для зарубежного производства характерна широкая кооперация. Изготовление деталей прецизионных механизмов может производиться на большом количестве специализированных предприятий. Это являет-

Это утверждение ошибочно. Величина зазора между контактирующими деталями не является равномерной и в нагруженном состоянии может меняться от нуля до максимального значения. Поэтому даже самые мелкие частицы будут оказывать влияние на износ поверхностей прецизионных пар.

Наличие множества мелких частиц ведет к зашламлению рабочих жидкостей. Под воздействием давления и вибраций это может приводить к их коагуляции, образуя конгломерат, который способен заклинить прецизионные пары трения.

Наконец, наличие множества мелких частиц с большой поверхностью существенно влияет на химические процессы в рабочих жидкостях, например, на окисление мас-

ся причиной разработки большого количества узкоспециализированного оборудования, с наименьшими издержками решающего специфические задачи прецизионной обработки.

Для отечественных предприятий в большей степени характерно наличие замкнутых производственных циклов. Поэтому непосредственная попытка переноса зарубежных технологий может привести к необходимости одновременного внедрения десятков типов оборудования, решающего близкие производственные задачи.

Как отмечается в работе [15] в этой ситуации разумной альтернативой является создание технологических систем, объединяющих передовые достижения в размерной обработке, элементы прецизионных технологий и наиболее универсальные технологии отделки и очистки. Это требует изменения стратегии назначения режимов при размерной обработке.

На сегодняшний день режимы обработки задают, как правило, исходя из максимальной производительности получения геометрии заданной точности. Удаление возникающих ликвидов рассматривается в качестве несвязанной задачи. Альтернативой является их назначение на основе прогнозируемой наследственности при образовании микрорельефа, заусенцев, микрочастиц.

Финишная обработка в первом случае требует применения множества специализированных методов, поскольку образуются ликвиды с различными свойствами и размерами.

Во втором случае образование ликвидов с геометрией и размерами оптимальными для финишного удаления позволяет проводить операции очистки и отделки на универсальном оборудовании. Это в разы снижает общую трудоемкость при сохранении заданного уровня качества. Такой подход требует разработки новых технологических процессов финишной отделки и очистки. Однако ключевым фактором должно стать решительное изменение отношения к вопросам системного выполнения требований промышленной чистоты.

Применение специализированных прецизионных и ультрапрецизионных технологий должно быть взвешенным и оправданным. Например, очевидной является необходимость радикального изменения ситуации в инструментальном производстве отечественных предприятий. Изготовление и переточка инструмента без учета геометрии режущих кромок являются обычной практикой.

Приведенные выше данные показывают, что это неизбежно приводит к загрязнению поверхностей прецизионных деталей микрочастицами высокой твердости, которые при попадании в зазоры способны вызвать задиры на закаленных поверхностях золотников и даже привести к их заклиниванию.

Эффективное использования таких технологических систем требует создания специализированных экспертных баз данных, позволяющих

получать информацию, необходимую для назначения режимов финишной отделки и очистки, исходя из параметров предшествующей размерной обработки.

Задачи информационной интеграции подсистем размерной и финишной обработки требуют разработки специализированных САМ/САЕ модулей для создания управляющих программ для оборудования финишной отделки и очистки [15]. Отдельной задачей является разработка создание подсистем обеспечения функциональных покрытий и микрорельефа поверхностей.

### **Выводы**

1. Ускоренное развитие прецизионного производства движется фундаментальными причинами природного, экономического и социального характера. Этот процесс в ближайшем будущем может привести к существенным изменениям в характере и структуре промышленного производства, а развитие прецизионных технологий станет одним из основных факторов, определяющих конкурентоспособность национальных экономик.

2. Основными тенденциями развития прецизионной обработки являются: непрерывный рост точности обработки; миниатюризация обрабатываемых деталей; опережающее развитие бездеформационных способов обработки; переход к технологиям адаптивной обработки на основе встроенных систем измерения и мониторинга; интенсивное внедрение информационных технологий на основе передовых достижений в области САД.

3. Образование ликвидов различного вида является неизбежным при любых видах размерной обработки прецизионных деталей. Финишная отделка и очистка являются обязательным и одним из ключевых элементов технологических систем прецизионного производства, обеспечивающим такие важнейшие эксплуатационные характеристики как ресурс и безотказность.

4. Реинжиниринг отечественных производств высокоточного машиностроения должен идти путем создания технологических систем, объединяющих передовые достижения в размерной обработке, элементы прецизионных технологий и универсальные технологии отделки и очистки. Ключевым фактором повышения качества продукции должно стать системное выполнение требований промышленной чистоты.

### **Список использованных источников**

1. Shore, P. Ultra-precision: enabling our future [Текст] / P. Shore, P. Morantz // Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 370. – P. 3993 – 4014.
2. Emerging global trends in advanced manufacturing [Текст] : Report / Institute for Defense Analyses; auth. Ship S.S. [et al.]. – Alexandria, VA

(USA), 2012. – 248 p. – IDA Paper P-4603.

3. McKeown, P.A. The role of precision engineering in manufacturing of the Future [Текст] / P.A. McKeown // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1987. – Vol. 36, No. 2. – P.495 – 501.

4. Ragnarsdóttir, K.V. Assessing long term sustainability of global supply of natural resources and materials [Текст] / K.V. Ragnarsdóttir, H.U. Sverdrup, D. Koca // Sustainable Development – Energy, Engineering and Technologies – Manufacturing and Environment / Ed. by C. Ghenai. – InTech, 2012. – Ch. 5. – P. 83 – 116.

5. Hubbert, M.K. Techniques of prediction as applied to production of oil and gas [Текст] / M.K. Hubbert // Oil and Gas Supply Modeling : Proceedings of a Symposium, June 18-20, 1980. – Washington, 1982. – P. 16 – 141.

6. Advanced Manufacturing. New Manufacturing Engineering [Электронный ресурс] : Report / Business Innovation Observatory; auth. Probst L. [et al.]. – European Union, 2013. – 21 p. – Режим доступа: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/policy/business-innovation-observatory/files/case-studies/02-amt-new-manufacturing-engineering\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/policy/business-innovation-observatory/files/case-studies/02-amt-new-manufacturing-engineering_en.pdf)

7. Arafat, M.T. State of the art and future direction of additive manufactured scaffolds-based bone tissue engineering [Текст] / M.T. Arafat, I. Gibson, X. Li // Rapid Prototyping Journal. – 2014. – Vol. 20, Is. 1. – P.13 – 26.

8. Wohlers, T. Wohlers Report 2011: Additive Manufacturing and 3D Printing. State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report [Текст] / T. Wohlers. – Fort Collins: Wohlers Associates, 2011. – 270 p.

9. Taniguchi, N. Nanotechnology: Integrated processing systems for ultra precision and ultrafine products [Текст] / N. Taniguchi. – Oxford: Oxford University Press, 1996. – 406 p.

10. McKeown, P.A. High precision manufacturing and the British economy [Текст] / P.A. McKeown // Proceedings of the Institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 1986. – Vol. 200, No. 3. – P. 147 – 165.

11. Byrne, G. Flight 427 : Anatomy of an Air Disaster [Текст] / G. Byrne. – New York: Copernicus Books, 2002. – 295 p.

12. Яковлева, С.А. Исследование и разработка технологических методов повышения точности и размерной стабильности прецизионных деталей и узлов гироскопических приборов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14 : защищена 20.10.2012 : утв. 16.12.2012 / Яковлева Светлана Анатольевна. – Санкт-Петербург, 2012. – 141 с.

13. Lasemi, A. Recent development in CNC machining of freedom surfaces: A state-of-the art review [Текст] / A. Lasemi, D. Xue, P. Gu // Computer-Aided Design. – 2010. – Vol. 42. – P. 641 – 654.

14. Brinksmeier, E. Micro-machining [Текст] / E. Brinksmeier, W. Preuss // Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 370. – P. 3973 – 3992.

15. Технологические системы обеспечения качества изделий машиностроения [Текст] / В.С. Кривцов, С.И. Планковский, И.В. Бычков, А.В. Лосев // Технологические системы. – 2013. – № 1. – С. 60 – 70.
16. Extrude Hone – Finishing Technologies, Finishing Solutions [Электронный ресурс] / Kennametal Inc., 2010. – 16 p. – Режим доступа: <http://www.extrudehone.com/media/files/capabilities.pdf>.
17. An Integrated International Standard for Burrs and Edge Finishing [Текст] : Report / Deburring Technology International Inc.; auth. Gillespie L.K. – Kansas City, MO (USA), 1998. – 36 p. – No. WBTC STD-14.1998.
18. The Standardization for the Edge Quality of the Precise Machining Products [Текст] / Y. Kato, K. Ohmri, E. Hatano, K. Takazawa // Advanced Materials Research. – 2007. – Vol. 24-25. – P. 83 – 90.
19. Byrne, G. Advancing Cutting Technology [Текст] / G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 52, Iss. 2. – P. 483 – 507.
20. Analysis of Cutting Fluid Aerosol Generation for Environmentally Responsible Machining [Текст] / Z. Chen, A. Atmadi, D. Stephenson [et al.] // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2000. – Vol. 49, Is. 1. – P. 53 – 56.
21. Cutting Fluid Aerosol Generation due to Spin-off in Turning Operation: Analysis for Environmentally Conscious Machining [Текст] / Z. Chen, K. Wong, W. Li [et al.] // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2001. – Vol. 123, Iss. 3. – P. 506 – 512.
22. Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии [Текст] : монография / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин [и др.]. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.
23. Understanding the Formation of Nano and Micro Particles during Metal Cutting [Текст] / R. Khettabi, V. Songmene, J. Masounave, I. Zaghbani // International Journal of Signal System Control and Engineering Application. – 2008. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 203 – 210.
24. ГОСТ ИСО/ТО 10949-2007. Чистота промышленная. Руководство по обеспечению и контролю чистоты компонентов гидропривода от изготовления до установки [Текст]. – Введ. 2008-12-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 9 с.
25. Тимиркеев, Р.Г. Количественные зависимости влияния параметров механических примесей на показатели надежности золотниковых агрегатов гидротопливных систем [Текст] / Р.Г. Тимиркеев, В.В. Плихунов, Н.Н. Губин // Авиационная промышленность. – 2000. – № 3. – С. 102 – 109.

*Поступила в редакцию 24.02.2015.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*