

Токарев Д.И., Дроздов А.А., Гуляев М.Н., Сиротенко Л.Д., Исламов В.Ф. Особенности точения пластиков Ф-4, ПА-6, Ф-4К20 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 35–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.05

Tokarev D.I., Drozdov A.A., Gulyaev M.N., Sirotenko L.D., Islamov V.F. Features turning plastics F-4, PA-6, F-4K20. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 35-42. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 20, № 2, 2018**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.05  
УДК 621.9

**Д.И. Токарев<sup>1</sup>, А.А. Дроздов<sup>1</sup>, М.Н. Гуляев<sup>1</sup>, Л.Д. Сиротенко<sup>1</sup>, В.Ф. Исламов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> ООО «Кедрон», Пермь, Россия

**ОСОБЕННОСТИ ТОЧЕНИЯ ПЛАСТИКОВ Ф-4, ПА-6, Ф-4К20**

Статья посвящена сравнительному исследованию стойкости режущей части инструмента (быстрорежущая сталь Р18, твердый сплав ВК8, алмаз CVD) при точении различных марок пластиков (Ф-4, ПА-6, Ф-4К20) с целью определения обрабатываемости резанием для каждой марки пластика. В лабораторных условиях подбирались оптимальные режимы резания с точки зрения обеспечения максимальной стойкости и производительности обработки. Глубина резания выбиралась равной припуску на обработку с максимальным сокращением времени обработки. Подачу выбирали из условия обеспечения требуемой шероховатости поверхности детали: для обеспечения Ra = 3,2 мкм необходима подача 0,3 мм/об, для Ra = 1,25 мкм – 0,2 мм/об, для Ra = 0,63 мкм – 0,1 мм/об. Скорость резания выбиралась из соображений обеспечения рационального соотношения стойкости инструмента и производительности обработки: для Ф-4 резцом из Р18 оптимальный диапазон значений скорости резания 150–200 м/мин, для ПА-6 резцом из ВК8 – 250–300 м/мин, для Ф-4К20 резцом из CVD – 500–600 м/мин. Сравнительные стойкостные испытания проводились в производственных условиях ООО «Кедрон» при точении деталей типа «кольцо» из трех различных марок пластиков: Ф-4, ПА-6, Ф-4К20. При обработке Ф-4 стойкость инструмента из Р18 составила T = 250 мин, стойкость инструмента из ВК8 составила T = 300 мин, причем применение водоземлюсионной СОЖ не оказало влияния на стойкость. При обработке ПА-6 без СОЖ стойкость инструмента из Р18 составила T = 20 мин, стойкость инструмента из ВК8 составила T = 150 мин; при точении с водоземлюсионной СОЖ стойкость инструмента из Р18 составила T = 25 мин, стойкость инструмента из ВК8 составила T = 200 мин. При обработке Ф-4К20 стойкость инструмента из ВК8 составила T = 25 мин, а стойкость инструмента из химически осажденного алмаза CVD составила T = 500 мин, причем применение водоземлюсионной СОЖ не оказало влияния на стойкость. Показано, что различные марки пластиков, несмотря на кажущееся сходство (как в случае материала Ф-4 и его композиции Ф-4К20), могут существенным образом отличаться друг от друга по критерию обрабатываемости резанием, что обусловлено их абразивными свойствами, которые проявляются при механической обработке.

**Ключевые слова:** точение пластиков, обрабатываемость резанием, интенсивность износа, стойкость инструмента, алмазный резец, фторопласт, тефлон, коксонаполненный фторопласт, полиамид, капролон, качество детали, точность обработки, шероховатость, температурные деформации, остаточные напряжения.

**D.I. Tokarev<sup>1</sup>, A.A. Drozdov<sup>1</sup>, M.N. Gulyaev<sup>1</sup>, L.D. Sirotenko<sup>1</sup>, V.F. Islamov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC "Kedron", Perm, Russian Federation

**FEATURES TURNING PLASTICS F-4, PA-6, F-4K20**

The article is devoted to the comparative study of the resistance of the cutting part of the tool (high-speed steel P18, hard alloy VK8, diamond CVD) at turning different grades of plastics (F-4, PA-6, F-4K20), for determination of machinability by cutting for each brand of plastic. In the laboratory, the optimal cutting conditions were selected in terms of maximum durability and processing capacity. The cutting depth was chosen equal to the allowance for processing, reducing the processing time as much as possible. Feed was selected from the conditions to ensure the required roughness of the surface of the part: to ensure Ra 3.2 microns required feed 0.3 mm / rev, Ra 1.25 microns-0.2 mm/rev, Ra 0.63 microns – 0.1 mm / rev. The cutting speed was chosen for reasons of ensuring a rational ratio of tool life and machining performance: for F-4 cutter from R18 the optimal range of cutting speeds 150-200 m/min, PA-6 cutter from VK8 – 250-300 m/min, for F-4K20 cutter from CVD – 500-600 m / min. The durability comparative tests were carried out under production conditions LLC "Kedron" in turning parts of type "Ring" of three different grades of plastics: F-4, PA-6, F-4K20. When processing F-4 tool life of R18 amounted to T = 250 min, the tool life of the VK8 amounted to T = 300 min. Use water-based coolant has no impact on durability. When processing a PA-6 without coolant tool life of R18 amounted to T = 20 min, tool life of the VK8 amounted to T = 150 min; when turning with a water-based coolant on tool life of R18 amounted to T = 25 min, the tool life made of VK8 T = 200 min. In processing F-4K20 tool life from VK8 amounted to T = 25 min, tool life of chemically deposited diamond CVD amounted to T = 500 min. Use water-based coolant has no impact on durability. It is shown that different grades of plastics, despite the apparent similarity (as in the case of the material F-4 and its composition F-4K20), may differ significantly from each other on the criterion of machinability cutting, due to their abrasive properties, which are manifested in machining.

**Keywords:** plastic turning, cutting machinability, wear intensity, tool life, diamond cutter, fluoropolymer, teflon, coke-filled fluoropolymer, polyamide, caprolon, part quality, machining accuracy, roughness, temperature deformation, residual stress.

## Введение

В современной технике и изделиях все чаще используют различные виды пластиков, в том числе с новыми свойствами. В связи с чем, при подготовке производства возникает необходимость разработки наиболее рационального технологического процесса. Для этого принято группировать обрабатываемые материалы по критерию обрабатываемости резанием таким образом, чтобы они соответствовали выбранному инструменту: легкообрабатываемые пластики – быстрорежущие стали, среднеобрабатываемые пластики – твердые сплавы, труднообрабатываемые пластики – сверхтвердые материалы. Обрабатываемость резанием в первую очередь характеризуется степенью интенсивности износа режущего инструмента и обеспечением качества детали.

На кафедре «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета совместно с ООО «Кедрон» ведутся работы по проблемам точения пластиков. Студенты успешно проходят практику на предприятии и впоследствии трудоустраиваются. В настоящее время в учебном процессе большое внимание уделяется изучению новых современных материалов, в том числе пластиков, и проблемам их механической обработки. Компания ООО «Кедрон» является производителем точных изделий из фторопласта, полиамида и композиций на их основе, располагает современной производственной базой, оснащенной станками с ЧПУ. Производственные мощности обеспечивают полный цикл изготовления деталей от производства заготовок до механической обработки.

Целью данной работы было проведение сравнительных стойкостных испытаний режущей части инструмента из разных марок (быстрорежущая сталь P18, твердый сплав BK8, химически осажденный алмаз CVD) для определения обрабатываемости резанием при точении пластиков марок Ф-4, ПА-6, Ф-4К20. Результаты внедрены в производство на предприятии ООО «Кедрон».

## Обзор литературы

Вопросами механической обработки пластмасс занимались такие ученые, как Б.П. Штучный [1], А. Кобаяши [2], А.А. Степанов [3], Р.А. Тихомиров [4] и др. В рассматриваемой литературе указаны основные рекомендации по точению пластиков. Однако эти данные невозможно напрямую применить к современным материалам и режущему инструменту в связи с их существенным отличием от материалов и инструментов 70–80-х гг. прошлого века.

В работе Б.П. Штучного [1] рассмотрены процессы обработки пластмасс: точение, сверление,

фрезерование, разрезание, нарезание резьбы, абразивная обработка. Рекомендации по режимам резания пластмасс даны для групп материалов, близких по свойствам, структуре и агрегатному состоянию. Это позволяет расширить область использования приведенных рекомендаций и применять их при обработке новых материалов.

С точки зрения технолога интересна работа Р.А. Тихомирова [4], в которой описаны различные методы механической обработки пластмасс. Рассматриваются возможности механического разрезания пластмасс приводными ножницами, абразивным инструментом, дисковыми фрезами, ленточными и дисковыми пилами, струями жидкости высокого давления, алмазным инструментом. Описываются возможности точения алмазными резцами, твердым сплавом и быстрорежущей сталью, фрезерование и сверление пластмасс, шлифование и полирование полимеров. Рассматриваются технологические особенности обработки стеклопластиков, реактопластов и термопластов. В данной работе хоть и в общем виде, но даны технологические рекомендации по механической обработке пластиков.

В работе О.Ю. Еренкова [5] показано, что предварительное механическое нагружение (растяжение и сжатие) заготовок из полимерных материалов при последующем точении снижает шероховатость обработанной поверхности в 2 раза по сравнению с простым точением. Общую тенденцию к снижению шероховатости обработанной поверхности после предварительного деформирования путем сжатия можно объяснить следующим образом. После снятия сжимающей нагрузки на заготовку в объеме материала действуют остаточные растягивающие напряжения, обеспечивающие эффект двойного технологического разупрочнения поверхностного слоя заготовки. Во-первых, за счет их действия появляются поверхностные дефекты в виде микротрещин. Во-вторых, в вершинах имеющихся и появившихся микротрещин образуются зоны перенапряжения, или зоны пластической деформации. В данных зонах имеет место частичное разрушение как химических, так и межмолекулярных связей полимера, что и является основой смягчения условий дальнейшей токарной обработки и повышения качества обработанной поверхности. Такой же эффект наблюдался при предварительной обработке заготовок поверхностно-активными веществами. Данные получены для полимерных материалов капролон, фторопласт, текстолит и гетинакс.

В работе Л.Н. Шафигуллина [6] установлены закономерности влияния вида, количества и дисперсности наполнителя на эксплуатационные

свойства полимерных наполненных композиционных материалов. Определено, что механическая обработка дисперсно-наполненных композиционных материалов наиболее оптимальна в интервале наполнения 0,2–0,4. Установлено, что эпоксидные композиты, наполненные гранитным порошком, обладают высокими физико-механическими, технологическими свойствами и качеством обработанных изделий. Введение в композиционные материалы полиамидного волокна повышает их упругие, прочностные, технологические свойства и качество обработанных изделий. Изучено влияние рецептурно-технологических факторов на технологические параметры обработки. Установлено, что изделия из полиэфирных наполненных композиционных материалов следует обрабатывать при более низких значениях подачи (при фрезеровании и сверлении  $S_z = 0,1 \dots 0,2$  мм/об) и более высоких значениях скорости резания (при фрезеровании  $n = 1000 \dots 1500$  об/мин; при сверлении  $n = 500 \dots 1000$  об/мин), чем изделия из эпоксидных и эпоксиполиуретановых композитов.

В работе М. Валид [7] получены математические модели для расчета зависимости динамических составляющих силы резания и вибраций державки резца при точении синтетрана от подачи и скорости резания методом планирования эксперимента.

В работе О.А. Иванова [8] изучены процессы разрушения в композиционных углепластиках при механической обработке.

В работе М.В. Доц [9] исследовано влияние режимов резания на шероховатость обработанной поверхности и глубину дефектного слоя при точении стеклопластика твердосплавными резцами ВК8. Выявлено, что при скорости резания более 80 м/мин, подаче более 0,3 мм/об и значении силы резания более 350 Н на поверхности детали появляются прижоги, однако при обработке с малыми скоростями резания и подачей 0,1 мм/об наблюдаются вырывы частиц наполнителя. Установлено, что на рост величины дефектного слоя наибольшее влияние оказывает подача. Так, при ее изменении с 0,1 до 0,71 мм/об дефектный слой увеличивается в 2,0–3,7 раза для разных типов пластин.

В работе Е.Б. Бондарь [10] предложена модель оптимизации при точении стеклопластика твердосплавными резцами ВК8, позволяющая определять режимы резания, марку твердого сплава и тип режущей пластины, обеспечивающие максимальную производительность или минимальную себестоимость обработки.

В работах [11–14] рассмотрены вопросы силового взаимодействия при обработке резанием полимерных композиционных материалов.

В современных зарубежных публикациях [15–20] также представлены различные аспекты обработки полимеров и композитов резанием. Существующие коммерческие организации (ООО «Фирма Элмика» и др.), которые являются поставщиками импортных пластиков и, как правило, лишь частично дают рекомендации по их обработке, не публикуют полные данные своих исследований, поэтому невозможно оценить достоверность предоставляемой информации.

Таким образом, определение обрабатываемости различных марок пластиков при точении с целью разработки наиболее рационального технологического процесса, обеспечивающего максимальную стойкость инструмента, является актуальной научной задачей.

### Экспериментальное исследование

Сравнительные стойкостные испытания различных марок режущей части инструмента (быстрорежущая сталь Р18, твердый сплав ВК8, алмаз CVD) проводились в производственных условиях при точении деталей типа «кольцо» из трех различных марок пластиков (Ф-4, ПА-6, Ф-4К20).

Предварительно в лабораторных условиях подбирались оптимальные режимы резания с точки зрения обеспечения максимальной стойкости и производительности обработки. При этом режимы должны были обеспечивать требуемые параметры качества детали (точность размеров и шероховатость поверхности).

Глубина резания выбиралась равной припуску на обработку конкретной поверхности детали, чтобы снять припуск за 1 проход и тем самым максимально сократить время обработки. В результате экспериментальных исследований было установлено, что достижение требуемой шероховатости  $Ra = 3,2$  мкм обеспечивается подачей 0,3 мм/об,  $Ra = 1,25$  мкм – 0,2 мм/об,  $Ra = 0,63$  мкм – 0,1 мм/об. Скорость резания выбиралась из соображений обеспечения рационального соотношения стойкости инструмента и производительности обработки. Для обработки пластика Ф-4 резцом из быстрорежущей стали Р18 оптимальный диапазон значений скорости резания составил 150–200 м/мин, для обработки пластика ПА-6 резцом из твердого сплава ВК8 – 250–300 м/мин, для обработки пластика Ф-4К20 резцом из алмаза CVD – 500–600 м/мин.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при обработке пластиков нужно использовать острую режущую кромку, чтобы избежать подмятия обрабатываемого материала под режущий клин, что достигается большими значениями переднего ( $5^\circ$ – $8^\circ$ ) и заднего ( $6^\circ$ – $10^\circ$ ) углов

режущей пластины. Оптимальное значение радиуса при вершине резца 0,5–0,8 мм.

На точность обработки пластика точением существенное влияние оказывают конструктивные особенности деталей, такие как длина обработки (вылет от шпинделя), толщина стенок детали, поскольку пластики обладают повышенной упругой деформацией (маленькой жесткостью). Вследствие чего при проектировании операции следует предусматривать технологические способы повышения жесткости детали при обработке: люнеты, пробки, ребра жесткости. С целью предотвращения деформации тонкие детали необходимо зажимать равномерно по окружности вместо зажима их в трех точках.

Для обеспечения точности размеров необходимо учитывать температурные деформации пластика, которые возникают при нагреве детали в процессе обработки и последующем охлаждении. Для уменьшения температурных деформаций при точении применяют жидкостное или воздушное охлаждение. Поскольку большинство пластика отличается высоким коэффициентом теплового расширения, контроль размеров осуществляют на охлажденных деталях.

Кроме того, пластики сильно подвержены образованию остаточных напряжений в поверхностном слое детали, которые приводят к существенным (по сравнению с металлами) деформациям вследствие последующего перераспределения остаточных напряжений. Для снятия остаточных напряжений детали из пластика рекомендуется подвергать отпуску при температуре 50 °С с выдержкой 24 ч. После термообработки выполняют окончательные операции по точению.

Обработка детали из пластика марки Ф-4 осуществлялась быстрорежущим (Р18) и твердо-

сплавным (ВК8) инструментами. В результате стойкостных испытаний установлено, что стойкость инструмента из быстрорежущей стали Р18 составила в среднем  $T = 250$  мин, стойкость инструмента из твердого сплава ВК8 составила в среднем  $T = 300$  мин. Режущая кромка в обоих случаях слегка затуплялась (площадка износа по задней поверхности до 0,2 мм), что приводило к существенному ухудшению шероховатости обработанной поверхности, поэтому инструменты направлялись на переточку. Применение водоземulsionной СОЖ в обоих случаях не оказало существенного влияния на стойкость резцов. Сравнительный экономический анализ показал, что при обработке Ф-4 применение резца с пластинкой из быстрорежущей стали Р18 значительно целесообразнее, чем с пластинкой из ВК8. Кроме того, при заточке на быстрорежущей стали легче получить острую кромку, чем на твердом сплаве. Пластик марки Ф-4 имеет незначительную твердость (по Бринеллю 30–40 МПа), пластичен и достаточно хорошо поддается обработке быстрорежущим инструментом. Таким образом, его можно отнести к легкообрабатываемым пластикам.

В результате экспериментальных и производственных испытаний разработана наиболее рациональная с точки зрения обеспечения максимальной стойкости инструмента технология точения детали «кольцо» из пластика марки Ф-4. Токарная операция осуществляется на станке с ЧПУ резцом из быстрорежущей стали Р18 без СОЖ (рис. 1). Режимы резания: глубина резания  $t = 0,5 \dots 1,0$  мм, подача  $S = 0,15$  мм/об, число оборотов шпинделя  $n = 4000$  об/мин. Стойкость инструмента из быстрорежущей стали Р18 составляет  $T = 250$  мин.

Обработка детали из пластика марки ПА-6 осуществлялась быстрорежущим (Р18) и твердо-



Рис. 1. Обработка детали из пластика марки Ф-4

сплавным (ВК8) резцами. В результате стойкостных испытаний установлено, что при точении без СОЖ стойкость инструмента из быстрорежущей стали Р18 составила в среднем  $T = 20$  мин, стойкость инструмента из твердого сплава ВК8 составила в среднем  $T = 150$  мин. При точении с поливом водоземulsionной СОЖ стойкость инструмента из быстрорежущей стали Р18 составила в среднем  $T = 25$  мин, стойкость инструмента из твердого сплава ВК8 составила в среднем  $T = 200$  мин. Стойкость инструмента из быстрорежущей стали оказалась низкой, режущая кромка быстро теряла остроту, что приводило к ухудшению шероховатости детали. Стойкость инструмента из твердого сплава оказалась достаточно высокой, причем при использовании водоземulsionной СОЖ стойкость твердосплавного инструмента значительно увеличилась. В данном случае преимущество использования твердосплавного резца из ВК8 очевидно. Пластик марки ПА-6 имеет чуть большие по сравнению с Ф-4 твердость (по Бринеллю 100 МПа), прочность и антифрикционные свойства. Пластик марки ПА-6 плохо поддается обработке быстрорежущим инструментом, но хорошо обрабатывается твердосплавным инструментом. Таким образом, его можно отнести к среднеобрабатываемым пластикам.

По результатам экспериментальных работ разработана следующая технология точения детали «кольцо» из пластика марки ПА-6. Токарная операция осуществляется на станке с ЧПУ резцом из твердого сплава ВК8 с применением водоземulsionной СОЖ (рис. 2). Установлены следующие ре-

жимы резания: глубина резания  $t = 0,5 \dots 1,0$  мм, подача  $S = 0,12 \dots 0,22$  мм/об, число оборотов шпинделя  $n = 1000 \dots 1200$  об/мин. Стойкость инструмента из твердого сплава ВК8 составляет  $T = 200$  мин.

Обработка детали из пластика марки Ф-4К20 (композиция на основе Ф-4, в качестве наполнителя 20 % кокса) осуществлялась твердосплавным (ВК8) и алмазным (CVD) резцами. В результате стойкостных испытаний установлено, что стойкость инструмента из твердого сплава ВК8 составила в среднем  $T = 25$  мин, а стойкость инструмента из алмаза CVD составила в среднем  $T = 500$  мин. Режущая кромка пластины из твердого сплава ВК8 (рис. 3, а) имела площадку износа по задней поверхности размером 0,4 мм, без сколов, лунок и выкрашиваний, что говорит об абразивном характере износа. Режущая кромка пластины из алмаза CVD (рис. 3, б) не имела площадку износа по задней поверхности, при достижении резцом предельной стойкости на режущей кромке наблюдались с равной вероятностью округление режущей кромки (радиус округления около 0,1 мм) и выкрашивание (отдельные микросколы размером до 0,1×0,1 мм либо выкрашивание на всю длину кромки глубиной около 0,1 мм). Применение водоземulsionной СОЖ в обоих случаях не оказало существенного влияния на стойкость резцов. С учетом стоимости инструмента, количества и стоимости переточек применение алмазного резца признано экономически значительно более выгодным.

Материал Ф-4К20 применяется для изготовления уплотнительных изделий подвижных соединений и изделий антифрикционного на-

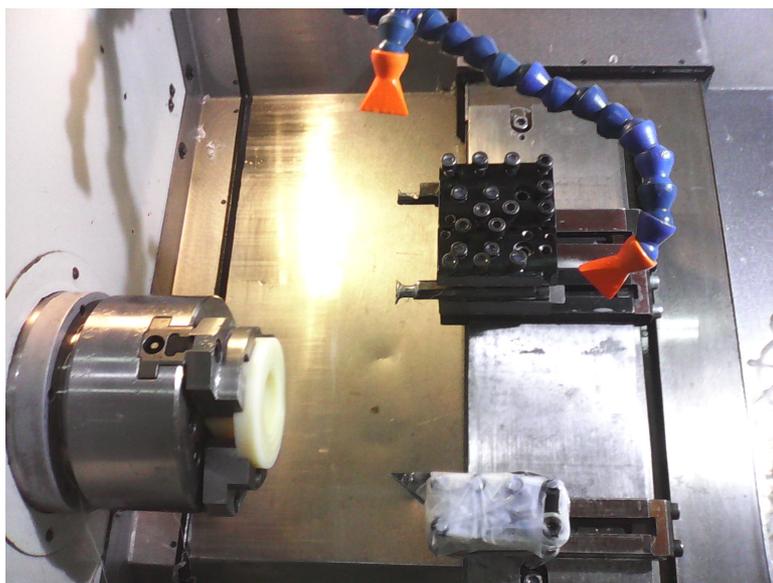


Рис. 2. Обработка детали из пластика марки ПА-6

значения, так как материал Ф-4К20 по сравнению с Ф-4 имеет в 600 раз большую износостойкость. В то же время такое резкое увеличение износостойкости композиции приводит к существенному изменению в обрабатываемости резанием. Пластик марки Ф-4К20, несмотря на маленькую твердость (по Бринеллю 49–54 МПа), обладает сильно выраженными абразивными свойствами из-за наличия частичек кокса, что приводит к существенному изменению технологии обработки пластика марки Ф-4К20 по сравнению с чистым Ф-4. Пластик марки Ф-4К20 плохо поддается обработке твердосплавным инструментом, но хорошо поддается обработке алмазным инструментом. Таким образом, его можно отнести к труднообрабатываемым пластикам.

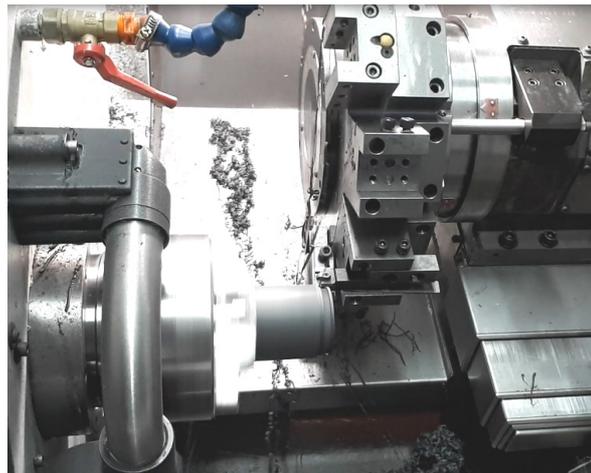
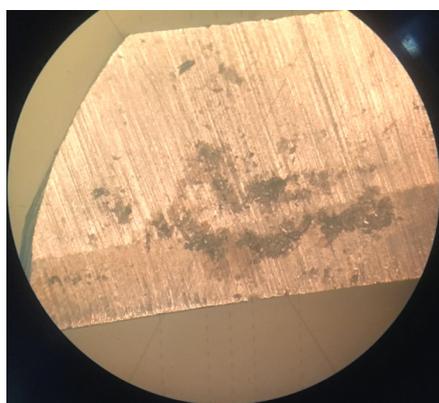
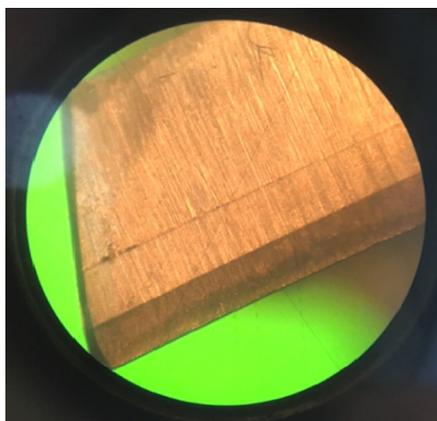


Рис. 4. Обработка детали из пластика марки Ф-4К20



а



б

Рис. 3. Характер износа режущей кромки инструментов из BK8 (а) и CVD (б),  $\times 50$

В результате проведенных экспериментальных работ разработана оптимальная технология точения детали «кольцо» из пластика марки Ф-4К20. Токарная обработка производится на станке с ЧПУ резцом из алмаза CVD без СОЖ (рис. 4). Режимы резания: глубина резания  $t = 0,5 \dots 1,0$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об, число оборотов шпинделя  $n = 2000$  об/мин. Стойкость инструмента из алмаза CVD составляет  $T = 500$  мин.

Из рассмотренных примеров видно, что различные марки пластиков, несмотря на кажущееся сходство (как в случае материала Ф-4 и его композиции Ф-4К20), существенно отличаются друг от друга по критерию обрабатываемости резанием. Причем это различие обусловлено абразивными свойствами компонентов пластиков, которые проявляются при механической обработке.

### Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Различные марки пластиков необходимо разделять по критерию обрабатываемости резанием на группы, соответствующие выбираемой марке режущей части инструмента: легкообрабатываемые пластики – быстрорежущие стали, среднеобрабатываемые пластики – твердые сплавы, труднообрабатываемые пластики – сверхтвердые материалы. Обрабатываемость резанием в первую очередь характеризуется степенью интенсивности износа режущего инструмента.

2. Сравнительные стойкостные испытания при точении деталей типа «кольцо» из трех различных марок пластиков показали, что при обработке достигается следующая максимальная стойкость: Ф-4 инструментом из P18 стойкость  $T = 250$  мин без СОЖ, ПА-6 инструментом из BK8 стойкость  $T = 200$  мин с водоземulsionной СОЖ, Ф-4К20 инструментом из CVD стойкость  $T = 500$  мин без СОЖ.

3. Показано, что различные марки пластиков, несмотря на кажущееся сходство (как в случае материала Ф-4 и его композиции Ф-4К20), могут существенно отличаться друг от друга по критерию обрабатываемости резанием, что обусловлено их абразивными свойствами, которые проявляются при механической обработке.

## Список литературы

1. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс: справ. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
2. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
3. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
4. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс. – Л.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
5. Еренков О.Ю. Повышение качества токарной обработки полимерных материалов на основе обеспечения стабильности технологической системы и предварительных внешних воздействий на заготовки: дис. ... д-ра техн. наук / Тихоокеан. гос. ун-т. – Хабаровск, 2009. – 326 с.
6. Шафигуллин Л.Н. Исследование высокотехнологичных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами для изделий машиностроения: дис. ... канд. техн. наук / Кам. гос. инж-экон. акад. – Naberezhnye Chelny, 2009. – 247 с.
7. Валид М. Математическое и физическое моделирование динамики процесса резания композиционных структурно-неоднородных материалов: на примере синтетрана: дис. ... канд. техн. наук / Рос. ун-т дружбы народов. – М., 2005. – 189 с.
8. Иванов О.А. Повышение эффективности лезвийной обработки композиционных углепластиков на основе учета их физико-механических характеристик: дис. ... канд. техн. наук / С.-Петербург. ин-т машиностроения. – СПб., 2006. – 130 с.
9. Доц М.В. Обеспечение параметров качества поверхностей деталей из стеклопластика на основе нейросетевых моделей формирования шероховатости: дис. ... канд. техн. наук / Алт. гос. техн. ун-т. – Барнаул, 2007. – 149 с.
10. Бондарь Е.Б. Повышение производительности изготовления деталей из стеклопластика резами со сменными многогранными пластинами: дис. ... канд. техн. наук / Алт. гос. техн. ун-т. – Барнаул, 2007. – 122 с.
11. Белецкий Е.Н. Моделирование процесса силового взаимодействия инструмента при механической обработке заготовок ответственных деталей из композиционных углепластиков, применяемых в судостроении // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 6(28). – С. 67–76.
12. Еренков О.Ю. Резание полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2015. – 80 с.
13. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 2. – С. 40–48.
14. Композиционные материалы: справ. / под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
15. Eneyew E.D., Ramulu M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites // Journal of Materials Research and Technology. – 2014. – Vol. 3. – P. 354–362.
16. Gubbels G.P.H. Diamond turning of glassy polymers: Ph.D. in thesis / Technische Universiteit Eindhoven. – Eindhoven, 2006. – P. 35–39.
17. Ravikanth P.R., Karna S.S. Optimization of various process parameters for CFRP composite materials ma-

chining // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – Ver. VI (Nov.–Dec. 2016). – Vol. 13, iss. 6. – P. 35–40.

18. Surinder K. Optimization of surface roughness in turning unidirectional glass fiber reinforced plastics (UD-GFRP) composites using polycrystalline diamond (PCD) cutting tool // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – June 2012. – Vol. 19. – P. 163–174.

19. Syed Altaf Hussain, Pandurangadu V., Palani K. Kumar. Optimization of surface roughness in turning of GFRP composites using genetic algorithm // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2014. – Vol. 6, iss. 1. – P. 49–57.

20. Xiao K.Q., Zhang L.C. The role of viscous deformation in the machining of polymers // International Journal of Mechanical Sciences. – 2002. – Vol. 44, 2317–2336. – P. 123–131.

## References

1. Shtuchnyi B.P. Mekhanicheskaya obrabotka plastmass [Machining of plastic]: spravochnik. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 152 p.
2. Kobaiashi A. Obrabotka plastmass rezaniem [Processing of plastic cutting]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 192 p.
3. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov [Processing by cutting of high-strength composite polymeric materials]. Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 176 p.
4. Tikhomirov R.A., Nikolaev V.I. Mekhanicheskaya obrabotka plastmass [Machining of plastic]. Leningrad: Mashinostroenie, 1975, 208 p.
5. Erenkov O.Iu. Povyshenie kachestva tokarnoi obrabotki polimernykh materialov na osnove obespecheniia stabil'nosti tekhnologicheskoi sistemy i predvaritel'nykh vneshnikh vozdeistvii na zagotovki [Improvement of quality of turning of polymeric materials on the basis of ensuring stability of technological system and preliminary external impacts on preparations]. Doctor's degree dissertation. Khabarovsk, 2009, 326 p.
6. Shafigullin L.N. Issledovanie vysokotekhnologichnykh kompozitsionnykh materialov s zadannymi fiziko-mekhanicheskimi svoystvami dlia izdelii mashinostroeniia [Research of hi-tech composite materials with the set physico-mechanical properties for mechanical engineering products]. Doctor's degree dissertation. Naberezhnye Chelny, 2009, 247 p.
7. Valid M. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie dinamiki protsessa rezaniia kompozitsionnykh strukturno-neodnorodnykh materialov: na primere sintegrana: dis. ... kand. tekhn. nauk / Rossiiskii universitet druzhby narodov. M., 2005. 189 s.
8. Ivanov O.A. Povyshenie effektivnosti lezviinnoi obrabotki kompozitsionnykh ugleplastikov na osnove ucheta ikh fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik [Increase in efficiency of lezviiny processing of composite coal plastics on the basis of accounting of their physico-mechanical characteristics]. Ph. D. thesis. Saint-Petersburg, 2006, 130 p.
9. Dots M.V. Obespechenie parametrov kachestva poverkhnostei detalei iz stekloplastika na osnove neirosetevykh modelei formirovaniia sherokhovatosti [Ensuring parameters of quality of surfaces of details from fibreglass on the basis of neural network models of formation of roughness]. Ph. D. thesis. Barnaul, 2007, 149 p.

10. Bondar' E.B. Povyshenie proizvoditel'nosti izgotovleniia detalei iz stekloplastika reztsami so smennymi mnogogrannymi platinami [Increase in productivity of production of details from fibreglass cutters with replaceable many-sided plates]. Ph. D. thesis. Barnaul, 2007, 122 p.

11. Beleckii E.N. Modelirovanie protsessa silovogo vzaimodeistviia instrumenta pri mekhanicheskoi obrabotke zagotovok otvetstvennykh detalei iz kompozitsionnykh ugleplastikov, primeniaemykh v sudostroenii [Modeling of process of power interaction of the tool when machining preparations of responsible details from the composite coal plastics applied in shipbuilding]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2014, no. 6(28), pp. 67–76.

12. Erenkov O.Iu. Rezanie polimernykh kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie [Cutting of polymeric composite materials]. Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2015, 80 p.

13. Zubarev I.U.M., Priemyshev A.V., Zaostrovskii A.S. Osobennosti lezviinoi obrabotki rezaniem zagotovok iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Features of lezviyny processing by cutting of preparations from polymeric composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 2, pp. 40–48.

14. Kompozitsionnye materialy [Composite materials]. Ed. D.M. Karpinosa. Kiev: Naukova dumka, 1985, 592 p.

15. Eneyew E.D., Ramulu M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2014, Vol. 3, pp. 354–362.

16. Gubbels G.P.H. Diamond turning of glassy polymers: Ph.D. Thesis. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, 2006, pp. 35–39.

17. Ravikanth P.R., Karna S.S. Optimization of various process parameters for CFRP composite materials machining. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2016. Nov.–Dec. Vol. 13, iss. 6, pp. 35–40.

18. Surinder K. Optimization of surface roughness in turning unidirectional glass fiber reinforced plastics (UD-GFRP) composites using polycrystalline diamond (PCD) cutting tool. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. June, 2012, vol. 19, pp. 163–174.

19. Syed Altaf Hussain, Pandurangadu V., Palani Kumar K. Optimization of surface roughness in turning of GFRP composites using genetic algorithm. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2014, vol. 6, iss. 1, pp. 49–57.

20. Xiao K.Q., Zhang L.C. The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, vol. 44, no. 2317–2336, pp. 123–131.

## Об авторах

**Токарев Денис Иванович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: den.tokarev.201@yandex.ru.

**Дроздов Андрей Александрович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: dron.perm@mail.ru.

**Гуляев Максим Николаевич** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: gulyaev.maks@yandex.ru.

**Сиротенко Людмила Дмитриевна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sirotenko@pstu.ru.

**Исламов Владимир Фаритович** (Пермь, Россия) – начальник производства ООО «Кедрон»; e-mail: ivf@kedron.ru.

## About the authors

**Denis I. Tokarev** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Machine Construction Chair, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: den.tokarev.201@yandex.ru.

**Andrey A. Drozdov** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials, Technologies and Machine Construction Chair, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: dron.perm@mail.ru.

**Maxim N. Gulyaev** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Materials, Technologies and Machine Construction Chair, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: gulyaev.maks@yandex.ru.

**Lyudmila D. Sirotenko** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Materials, Technologies and Machine Construction Chair, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sirotenko@pstu.ru.

**Vladimir F. Islamov** (Perm, Russian Federation) – Head of Production of LLC “Kedron”; e-mail: ivf@kedron.ru.