

Секция 2: Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении

**СОЗДАНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ***М.Г. Креницын, м.н.с., Р.О. Черепанов, к.ф.-м.н., н.с., В.А. Юркина, инженер**Томский политехнический университет**634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, тел. (3822)-60-60-06**E-mail: krinmax@gmail.com*

В настоящей работе приведено исследование композиционных филаментов "ABS - углеволокно" с содержанием углеволокна до 10 вес.%. Исследована макроструктура полученных филаментов, в частности наибольшее внимание уделено исследованию ориентирования волокон в объеме филамента. Описаны технологические особенности процесса получения композиционного филамента, приведена наиболее оптимальная схема получения филамента, в том числе описана оптимальная технология подготовки углеволокна для введения в композит.

In the present work, a study of composite filaments "ABS-carbon fiber" with a carbon fiber content of up to 10% by weight is made. The macrostructure of the filaments is studied, in particular, the greatest attention is paid to the study of fiber orientation in the filament volume. Technological features of the process of composite filament preparation are described, the most optimal scheme of filament production is given, besides the optimal technology of carbon fiber preparation for introduction into the composite is described.

Активное развитие аддитивных технологий началось в начале XXI века, однако теоретические и технологические предпосылки их появления наблюдались еще в прошлом веке. Благодаря развитию аддитивных технологий появилась возможность изготавливать в более сжатые сроки детали различной формы, в том числе изготавливать изделия, которые невозможно изготовить классическими методами обработки материалов. С развитием технологий машиностроения стали ужесточаться условия эксплуатации механизмов и машин, в связи с чем выросли требования к конструкционным материалам. Одним из наилучших на сегодняшний день способов увеличения физико-технических характеристик материалов является создание из них композитов, путем введения в полимерную матрицу упрочняющих частиц, либо волокон. Такой способ упрочнения применим, как для металлических материалов [1,2], так и для полимерных.

Наилучшим способом увеличения прочностных характеристик пластмасс является упрочнение непрерывными волокнами [3]. Наиболее распространённым методом получения композитов, упрочненных волокнами, является введение в жидкую полимерную матрицу волокон с последующим отверждением полимера. Количество введенных волокон не превышает 40 об.%, хотя в большинстве случаев добавление 2-3% волокон приводит к увеличению физико-механических показателей материала [3].

В результате исследований [4] содержание углеродных волокон в пределах 5-30 мас.% в композите на основе ABS, увеличивает прочностные характеристики композита. Помимо этого, известно, что у композитов на основе ABS, упрочненных волокнами, свыше 2% удается достичь не только повышение физико-механических характеристик, но увеличение электропроводности, при этом увеличение длины углеродных волокон снижает удельное сопротивление композитов [5].

Одной из важных характеристик получаемых композиционных материалов является ориентированность волокон. Полимерные композиты с ориентированными волокнами демонстрируют лучшие физико-механические характеристики, чем композиты такого же состава с разориентированными волокнами [6], особенно это проявляется при испытаниях на изгиб и растяжение композитов в направлении ориентации волокон. Изготовление изделий из таких композитов подразумевает задание у них анизотропии свойств в связи с наличием предпочтительного направления приложения нагрузки к изделию в соответствии с эксплуатационными условиями.

При получении изделий методом аддитивных технологий, при правильном подборе режимов, удается получить ориентированность волокон в изделии [3], что также приводит к улучшению свойств материала в заданном направлении. Данная тенденция наблюдается в композитах с различными материалами матрицы: СВМПЭ [7], ABS [8], PLA [9], поликарбонат и полиамид [10,11], а также биосовместимые материалы, такие как зубной гипс [12]. Во всех этих случаях обнаруживается рост механических характеристик изделий.

Одной из важных характеристик, влияющей на свойства композита, является длина волокна. В статье [13] использовали волокна длиной 640 мкм, но авторы работы отмечают, что стоит использовать большую длину для увеличения прочности образцов, в том числе за счет увеличения адгезии волокна к материалу матрицы.

При изучении альтернативы объемному армированию было рассмотрено непрерывное армирование углеродным волокном. При сравнении образцов 3D-печати из ABS без содержания углеродного волокна и с содержанием непрерывного углеродного волокна, располагающегося по оси симметрии исходного ABS-прутка, наблюдается увеличение прочности напечатанных образцов при растяжении в направлении распределения волокна. При формировании изделия с распределением укладки волокон в процессе печати в направлении, отличном от растяжения, наблюдается менее эффективное увеличение механических свойств [14].

Важным является и выбор материала волокон для непрерывного армирования, использующих для упрочнения. Основными материалами, которые используются для упрочнения полимеров, являются углеродные, стеклянные волокна, арамидная нить. В исследовании, приведенном в статьях [15,16] видно явное преимущество армирования углеродным волокном, поскольку при проведении испытаний на изгиб, прочность на изгиб образцов, упрочненных углеродным волокном вдвое больше, чем при добавлении арамидной нити, и в три раза больше, чем при использовании стекловолокна в образцах. Прочность на растяжение и модуль упругости, зарегистрированные для образцов с углеродным волокном, составляли 600 МПа и 12,99 ГПа соответственно, тогда как прочность на растяжение и модуль упругости, зарегистрированные для образцов, упрочненных стекловолокном, составляли 450 МПа и 7,20 ГПа соответственно [17].

Другим упрочняющим материалом являются углеродные нанотрубки. При сравнении образцов, изготовленных из композиционного материала на основе ABS с добавлением углеродного волокна и с добавлением углеродных нанотрубок, можно сделать вывод, что образцы с добавлением углеродных волокон близки по своим прочностным характеристикам к образцам с добавлением нанотрубок [18]. Так же, в размягченном состоянии, образец, при наличии в составе углеродных волокон, имеет высокое ПТР [19]. Таким образом, с точки зрения получения наилучших свойств использование нанотрубок и углеродных волокон практически однозначно, однако, с экономической точки зрения использование углеродных и стекловолокон более предпочтительно, поскольку они обладают существенно меньшей себестоимостью, чем нанотрубки.

Современное состояние машиностроения требует создания новых материалов на полимерной основе и разработки технологии создания изделий из таких материалов, в том числе и с применением аддитивных технологий. Самые распространенные в машиностроении на сегодняшний день технологии аддитивного производства, такие как селективное лазерное [20, 21] и электронно-лучевое [22, 23] сплавление (SLS и EBM соответственно), в большинстве случаев неприменимы для полимерных материалов. Наиболее распространенной технологией аддитивного производства изделий из полимерных материалов является FDM-технология (Fused Deposition Modeling - моделирование методом послойного наплавления). Этот метод позволяет работать с полимерными материалами, при этом обладает низкой себестоимостью по сравнению с другими методами аддитивного производства. Для работы аддитивных машин по этой технологии требуется создание филамента – проволоки из материала, который в дальнейшем будет использован для создания изделия. На сегодняшний день распространен филамент простого состава, в основном ABS и PLA, тогда как наиболее перспективными являются композиционные материалы с матрицей из этих материалов, но дополнительно упрочненные волокнами.

Технология создания таких композиционных филаментов отличается от таковой для некомпозиционных материалов и требует особого изучения. Кроме того, как было указано выше, для обеспечения высоких свойств необходимо добиться ориентирования волокон вдоль заданного направления как в филаменте, так и в конечном изделии, а также использовать волокна определенного размера, обеспечивающего оптимальные значения физико-технических свойств. В данной статье исследована макроструктура композиционных филаментов «ABS-углеволокно», а также приведены результаты оптимизации технологических этапов изготовления таких композитов.

Материалы и методы исследования

Основной задачей настоящей работы являлось получение композиционного филамента на основе ABS пластика с армированием углеродным волокном. В качестве исходных материалов использовался вторичный ABS пластик, полученный путем размола изделий из ABS, и графитированный крученый жгут ГЖ-23/550к (ООО «Аргон», г. Балаково, Россия) с фактической линейной плотностью жгута 562 текс в качестве углеродного волокна. Изделия из ABS были получены ранее методом FDM из ABS пластиков различного производства, далее были подвергнуты искусственному старению в течение 17000 часов. Для размола ABS изделий и измельчения жгуте использовалась ножевая роторная мельница РМ-120 (Вибротехник, г. Санкт-Петербург, Россия) при частоте вращения ротора

1500 об/мин. Длительность помола в данной мельнице не контролируется, поскольку помол реализован насквозь без емкости для размола.

Полученные компоненты были перемешаны до гомогенной массы в верхнеприводной мешалке Hei-TORQUE Value 100 (Heidolph Instruments, г. Швабах, Германия) в течение 5 часов. Филамент для 3D-принтеров, работающих по технологии FDM, должен иметь постоянный диаметр на всем своем протяжении, и при изготовлении филамента из сухой смеси гранул ABS и углеродных волокон не удастся надежно контролировать диаметр филамента. Поэтому после получения смеси она была гранулирована с помощью двушнекового экструдера с гранулятором (10mm Twin Screw Extruder Microlab, Rondol, Франция) где смесь в установке нагревалась до температуры плавления ABS, после чего волокна вшивались в полимерную основу. Выходя из экструдера, полученный композит застывал и сразу же разрубался на гранулы. Из полученных гранул готовился филамент диаметром 1,75 мм путем экструдирования на автоматической системе экструдирования Filabot (Filabot, Вермонт, США) состоящей из экструдера Ex2 Filament Extruder, системы воздушного охлаждения Filabot Airpath и системы автоматического наматывания филамента на катушку Filabot Spooler.

Полученный филамент использовался для получения опытных образцов прямоугольного сечения методом FDM на 3D-принтере PrintBox3D One (RGT, г. Москва, Россия). Диаметр сопла принтера составлял 0,40 мм, на всем протяжении процесса печати температура сопла равнялась 230 °С. Скорость печати составляла 1,2 м/мин, толщина слоя – 200 мкм. Плотность заполнения была выставлена на 100 %, заполнение – линейное, с постоянной ориентацией вдоль длинной стороны прямоугольника. Макроструктура гранул, филамента и напечатанных образцов, в том числе распределение волокон по объему, исследовались с помощью цифрового микроскопа-камеры МК-20 (ООО «ЛОМО-Микросистемы», г. Санкт-Петербург, Россия).

Размер волокна

Композиты, армированные волокном, подразделяются на группы в соответствии с видами волокон, используемых для армирования. В классификации волокон основным изменяемым параметром является длина волокон. Волокна в композите могут иметь длину несколько миллиметров (например, короткие высокопрочные монокристаллы – «усы»), могут быть непрерывно армированы (то есть длина волокна не меньше габаритной длины изделия в направлении армирования), также возможны различные промежуточные варианты.

В данной работе использовались углеродные волокна, полученные путем размола непрерывного волокна. Длина волокон после размолотков изменялась и варьировалась от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Исходя из литературных данных, в данном диапазоне длин волокна для композиционных материалов применим принцип «чем длиннее – тем лучше». В связи с этим необходимо было выбрать количество помолотков, при которых не происходило бы сильного измельчения, и преимущественная длина волокна была близка к 1 мм.

Выбор такой длины волокна обусловлен двумя основными причинами: во-первых, при помолоте волокна и дальнейшем его смешивании с гранулами пластика при большом количестве длинных волокон (длиной несколько миллиметров и более) происходит электризация волокон и образуются большие агломераты, которые негативно сказываются на стабильности процесса получения филамента и его качестве. В частности, использование наэлектризованных агломератов волокон приводит к формированию пористости в филаменте, что в некоторых случаях может приводить к разрыву филамента, а в большинстве случаев приводит к ухудшению однородности материала, получаемого из такого филамента. Во-вторых, при длине волокна больше диаметра филамента (1,75 мм) ориентация волокна в процессе экструдирования происходит только за счет отсутствия степеней свободы у волокна, и это ориентирование является вынужденным. В данной работе основной целью является добиться ориентирования волокон вдоль одного направления независимо от их длины, поэтому более интересным является изучение ориентирования волокон, имеющих возможность располагаться в любом направлении относительно желаемого, вплоть до полностью поперечного.

После первичного размолотков волокон получали фотографии внешнего вида волокон при увеличении достаточном для измерения их длины. Измерение длины волокон проводили с применением автоматизированного программного обеспечения, для каждого помола проводилось не менее тысячи измерений. Затем все волокна вновь загружались в мельницу без отсеивания либо добавления новых волокон и повторяли описанные процедуры. Всего было проведено 6 помолотков.

Результаты измерения длин волокон были обработаны в программе Statistica. Для всех помолотков распределение по длинам волокон подчиняется логнормальному распределению ($R^2 > 90\%$ для

всех помолов). Результаты измерения волокон а также их внешний вид приведены на рисунке 1. Более 90% волокон уже после первого помола имеют длину не более 300 мкм. Наибольшее количество волокон имеет размер от 20 до 100 мкм. При этом количество помолов незначительно влияет на длину волокон.

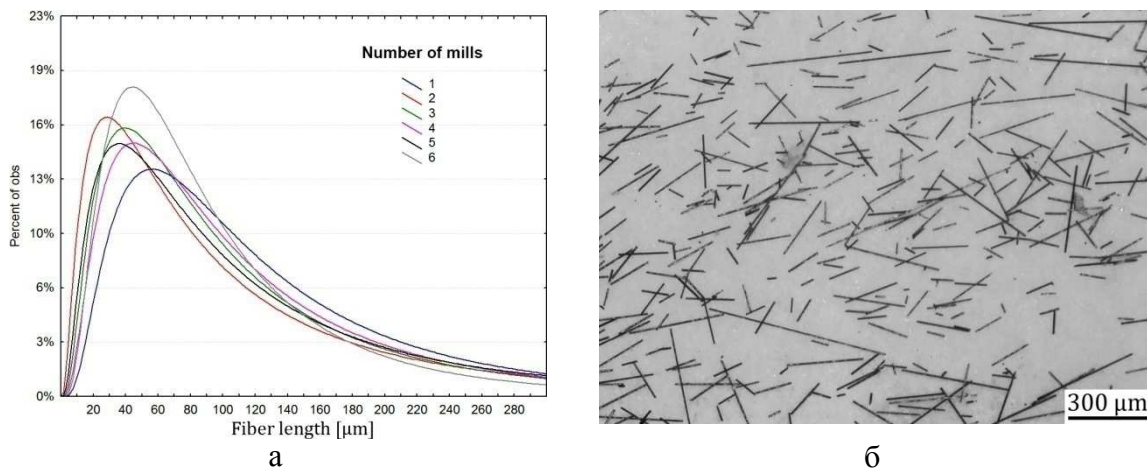


Рис. 1. Влияние количества помолов на распределение по длине волокон (а) и внешний вид волокон (б)

В ходе проведения помолов было установлено, что при количестве помолов более четырех, волокна сильно электризуются и образуют агломераты, что крайне нежелательно. Для дальнейшей работы были выбраны волокна, прошедшие четыре помола.

Таким образом, при подготовке углеродных волокон количество помолов не играет существенной роли. Для ускорения процесса получения композиционных филаментов достаточно проводить один помол длинного углеволокна, дальнейшие помолы являются опциональными. Полученный результат демонстрирует высокую скорость измельчения при использовании роторного помола – уже после первого помола длина более 90% волокон не превышает 300 мкм при длине исходных волокон $2 \cdot 10^5$ мкм. Дальнейшая обработка в роторной мельнице не приводит к существенному измельчению, но за счет интенсивного механического воздействия волокна наэлектризовываются, чего допускать нежелательно.

Ориентирование волокна

Одним из важных параметров в получении композитов, армированных волокном, является односторонняя ориентированность волокон. Для обеспечения этой ориентированности в материалах, полученных с применением аддитивных технологий, необходимо обеспечить ориентированность волокон еще до непосредственного проведения процесса печати. В случае технологии FDM необходимо обеспечить однонаправленность волокон в филаменте. В случае использования волокон с длиной, большей чем диаметр филамента, это ориентирование является вынужденным, в случае коротких волокон их ориентирование в объеме пластика зависит от гидродинамики процесса течения пластика.

ABS-пластик, экструдруемый из цилиндрического сопла с постоянной скоростью, описывается как неньютоновская жидкость. При описании экструдруемых вязких Ньютоновских жидкостей с помощью уравнений Навье-Стокса [24] при предположении постоянности вязкости по объему было с высокой точностью установлено и математически описано [25], что скорость сдвига максимальна вблизи стенок, а в центре экструдруемой струи близка либо равняется нулю. Для неньютоновских жидкостей данное описание менее точно, повышение точности описания возможно с помощью коррекции Рабиновича либо коррекции Бэгли [26], однако основной принцип остается неизменным – скорость сдвига вблизи стенок экструдера максимальна и снижается при приближении к центру.

В процессе экструдирования композиционного филамента происходит не только ориентирование молекул пластика, но и волокон вдоль направления экструдирования. Внешний вид поперечного сечения филамента с содержанием волокон 10 вес.% приведен на рисунке 2.

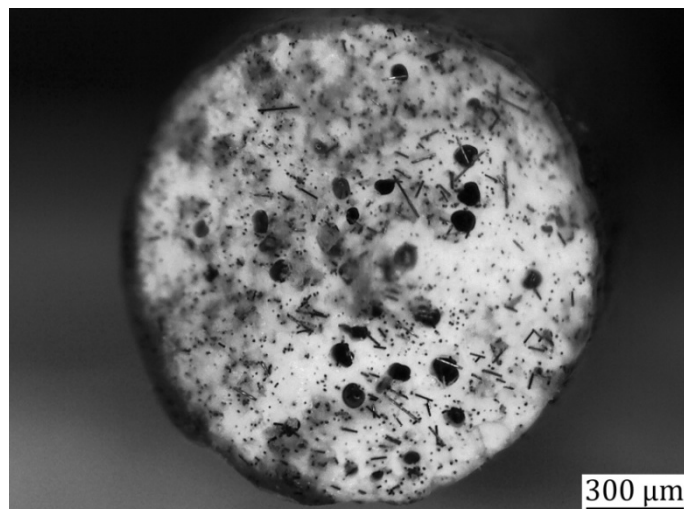


Рис. 2. Поперечное сечение композиционного филамента с углеродным волокном

На поперечном сечении видны волокна, ориентированные вдоль направления экструдирования, в виде мелких черных точек, хаотически ориентированные волокна и крупные поры в виде больших черных окружностей. Пористость филамента, измеренная по площади пор на нескольких сечениях, составляет 4%. Большинство волокон ориентированы вдоль направления экструдирования – количество волокон, ориентированных не перпендикулярно плоскости сечения, составляет 10%.

По описанной методике были получены филаменты с содержанием 3, 5 и 10 вес.%, внешний вид филаментов приведен на рисунке 3. Пластиковая матрица при малом содержании волокон практически прозрачна, что позволяет визуальнo идентифицировать волокна и определять их ориентированность без препарирования образцов. При увеличении содержания волокон филамент становится темнее и идентификация волокон усложняется. Для всех полученных составов характерна преимущественная ориентация вдоль направления экструдирования на всем протяжении филамента, а большинство хаотично ориентированных волокон имеют длину не более 50 мкм.

В дальнейшем из полученных филаментов будут изготовлены изделия методом FDM на которых, помимо исследования макроструктуры, будут проведены исследования механических свойств в зависимости от содержания волокон в композите.

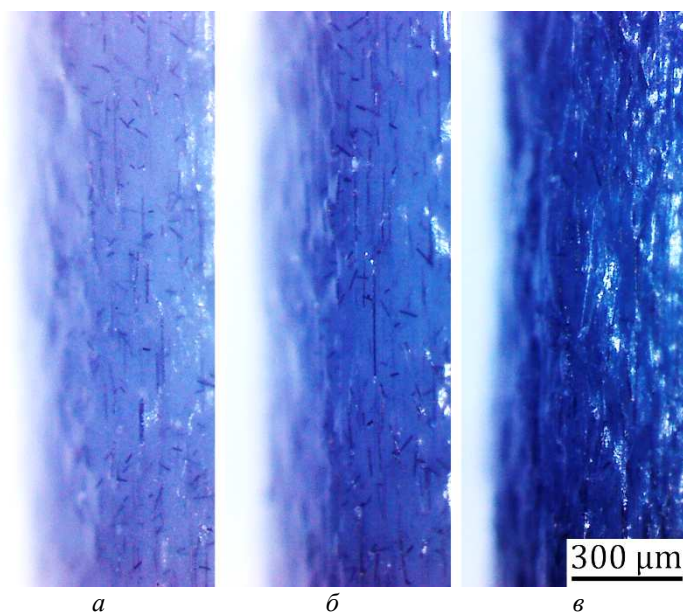


Рис. 3. Внешний вид филаментов с содержанием углеродного волокна 3 (а), 5 (б) и 10 (в) вес.%

В работе были исследованы композиционные филаменты "ABS-углеволокно" с различным содержанием углеволокна в композите для применения в технологии аддитивного производства методом FDM. Было установлено, что при подготовке коротких угленитей из длинных путем помола в роторной мельнице количество помолов не оказывает существенного влияния на распределение по длине волокон, однако после четырех помолов нити начинают сильно наэлектризовываться и агломерироваться.

При получении филамента из сухих смесей ABS гранул и молотого углеволокна не удастся получить стабильный по размерам и однородный по структуре филамент, в связи с чем необходимо предварительно получить композиционные гранулы большого диаметра и использовать их для получения филамента необходимого диаметра.

В полученном филаменте волокна преимущественно ориентированы вдоль направления экструдирования. Предположительно, в процессе печати волокна также будут преимущественно ориентироваться вдоль этого направления, что необходимо учитывать при моделировании 3D объектов для печати. В полученных филаментах не более 10% волокон ориентированы в направлении, отличном от направления экструдирования, однако угол отклонения от нужного направления для большинства волокон меньше 45°. Волокна, отличающиеся по ориентации на угол более 45°, имеют размеры менее 50 мкм. Пористость полученных филаментов составляет 4%.

Список литературы

1. Krinitcyn M. G. et al. Structural comparison of sintering products made of "TiC+ Ti" composite powders and "Ti+ C" powder mixtures //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2017. – Т. 1909. – №. 1. – С. 020105.
2. Korosteleva E. N., Korzhova V. V., Krinitcyn M. G. Sintering behavior and microstructure of TiC-Me composite powder prepared by SHS //Metals. – 2017. – Т. 7. – №. 8. – С. 290.
3. Tekinalp H. L. et al. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing //Composites Science and Technology. – 2014. – Т. 105. – С. 144-150.
4. Li J., Cai C. L. The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites //Current Applied Physics. – 2011. – Т. 11. – №. 1. – С. 50-54.
5. Liang X. et al. Resistivity of carbon fibers/ABS resin composites //Materials Letters. – 2000. – Т. 43. – №. 3. – С. 144-147.
6. Nak-Ho S., Suh N. P. Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites //Wear. – 1979. – Т. 53. – №. 1. – С. 129-141.
7. Chukov D. I. et al. Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites //Composites Part B: Engineering. – 2015. – Т. 76. – С. 79-88.
8. Nikzad M., Masood S. H., Sbarski I. Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling //Materials & Design. – 2011. – Т. 32. – №. 6. – С. 3448-3456.
9. Tian X. et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Т. 88. – С. 198-205.
10. Ning F. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling //Composites Part B: Engineering. – 2015. – Т. 80. – С. 369-378.
11. Ning F. et al. Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties //Journal of Composite Materials. – 2017. – Т. 51. – №. 4. – С. 451-462.
12. Christ S. et al. Fiber reinforcement during 3D printing //Materials Letters. – 2015. – Т. 139. – С. 165-168.
13. Quan Z. et al. Microstructural design and additive manufacturing and characterization of 3D orthogonal short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene preform and composite //Composites Science and Technology. – 2016. – Т. 126. – С. 139-148.
14. Jiang D., Smith D. E. Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication //Additive Manufacturing. – 2017. – Т. 18. – С. 84-94.
15. Dickson A. N. et al. Fabrication of Continuous Carbon, Glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using Additive Manufacturing //Additive Manufacturing. – 2017.
16. Li, Y.-H. et al. Mechanical properties of carbon fiber composite in fused deposition modeling of additive manufacturing // Journal of Plasticity Engineering. – 2017. – Т. 24. – С. 225-230.
17. Goh G. D. et al. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics //Materials & Design. – 2018. – Т. 137. – С. 79-89.

18. Zhang W. et al. Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling //Composites Part B: Engineering. – 2018. – Т. 137. – С. 51-59.
19. Mari D., Schaller R. Mechanical spectroscopy in carbon nanotube reinforced ABS //Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Т. 521. – С. 255-258.
20. Razin A. et al. The impact of dispersion on selective laser melting of titanium and niobium fine powders mixture //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2016. – Т. 1783. – №. 1. – С. 020190.
21. Ahmetshin R. G. et al. SLS setup and its working procedure //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications, 2016. – Т. 685. – С. 477-481.
22. Krinitcyn M. G., Pribytkov G. A., Durakov V. G. Structure and Properties of Electron-Beam Coatings, Overlaid of SHS Composite Powders" TiC–Ti", Synthesized in Air //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications, 2016. – Т. 685. – С. 719-723.
23. Klimenov V. et al. Structure and properties of parts produced by electron-beam additive manufacturing //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2017. – Т. 1909. – №. 1. – С. 020085.
24. Constantin P., Foias C. Navier-stokes equations. – University of Chicago Press, 1988.
25. Fu Z. et al. Micro-and macroscopic design of alumina ceramics by robocasting //Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – Т. 37. – №. 9. – С. 3115-3124.
26. Barakos G., Mitsoulis E. Numerical simulation of extrusion through orifice dies and prediction of Bagley correction for an IUPAC-LDPE melt a //Journal of rheology. – 1995. – Т. 39. – №. 1. – С. 193-209.

СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫМ КРУГОМ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

*Л.Л. Кременецкий, аспирант, В.А. Носенко, д.т.н., проф.
Волгоградский государственный технический университет
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, тел. (8442)-23-00-76
E-mail: kreleonid@yandex.ru*

Рассмотрен процесс глубинного шлифования титанового сплава Ti6Al4V высокопористым кругом из карбида кремния характеристики 64CF80H12V. Морфологию и химический состав поверхностей, полученных на скорости шлифования 20-30 м/с, исследовали на двухлучевом электронном микроскопе.

The process of creep-feed grinding Ti6Al4V titanium alloy by highly porous silicon carbide wheel 64CF80H12V is shown. The research of morphology and chemical composition of surfaces which were machined at 20-30 m/s grinding speed was carried out with using a twin-beam electron microscope.

Основной причиной плохой обрабатываемости титановых сплавов глубинным шлифованием является высокая адгезионная активность титана к абразивному материалу [1], что является причиной налипания обрабатываемого металла на вершины зерен и последующего переноса данного металла на обработанную поверхность [2, 3]. В наибольшей степени подходящим для обработки титановых сплавов шлифованием является именно инструмент из карбида кремния [4]. Негативным аспектом работы данного инструмента является шаржирование обрабатываемой поверхности продуктами износа [5]. В дальнейшем это влечет за собой ускоренное разрушение поверхностных слоев металла, что недопустимо для особо ответственных деталей [6]. В качестве мер обеспечения эффективности процесса рассматривают применение специальных СОЖ [7, 8], непрерывную правку [5, 9]. Одним из направлений повышения производительности шлифования так же является увеличение скорости резания.

Цель работы: исследование морфологии обработанной поверхности титанового сплава при различной скорости глубинного шлифования.

Методика исследования. Методом врезного встречного шлифования на профилешлифовальном станке-автомате модели SLS434 с ЧПУ обрабатывали заготовки из титанового сплава Ti6Al4V длиной 40 мм. В качестве абразивного инструмента использовали высокопористый шлифовальный круг характеристики 64CF80H12V производства ОАО «Волжский абразивный завод». Режимы обработки: скорость шлифования v : 20 м/с, 25 м/с и 30 м/с; скорость подачи стола 100 мм/мин, глубина шлифования 1 мм; подача правящего ролика 0,6 мкм/об. Смазочно-охлаждающую жидкость Castrol Syntilo 81 E под давлением 12 бар подавали с двух сторон круга: в зону правки и на гидроочистку круга. Расход жидкости – 200 л/мин. Морфологию и химический состав шлифованной поверхности исследовали на двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D. Химический состав определяли в микрообъеме поверхностного слоя сканированием по площади. Размер площади сканирования 1000×800 мкм, количество точек сканирования – 400.