




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

УДК 621.9

Научная статья / Research article

Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита

И.С. Михеенко, А.А. Смелик, С.А. Егоров , В.В. Черняк

Военный инновационный технополис ЭРА,
Российская Федерация, 353456, Анапа, Пионерский пр., д. 41
 E-mail: columbia1996@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 02 августа 2020 г.

Доработана: 31 сентября 2020 г.

Принята к публикации: 04 ноября 2020 г.

Аннотация. Существующая на сегодняшний день тенденция замены металлических сплавов композиционными материалами при изготовлении различных типов подшипников скольжения, уплотнительных элементов сборочных единиц, антифрикционных втулок и прочих деталей машин является одной из перспективнейших направлений, влияющих на развитие различных отраслей промышленности. Однако при изготовлении из композиционных материалов изделий современными методами, такими как экструзия, прессование, литье под давлением, возникают различного рода дефекты, характерные для данных видов обработки, вследствие чего не всегда возникает возможность получить надлежащее качество рабочих поверхностей деталей, а отсюда вытекает необходимость вводить дополнительную механическую обработку, от результата выполнения которой зависит долговечность узлов и изделий в целом. В статье проанализированы основные параметры, влияющие на качество получаемой поверхности при токарной обработке для металлических сплавов, а также для композиционных материалов. Разработана методика получения заготовок методом прессования из рассматриваемого композиционного материала, сконструирована и изготовлена необходимая для проведения исследования технологическая оснастка, построен план проведения по принципу полнофакторного эксперимента с созданием модели в программе Mathcad, осуществлен активный эксперимент по определению влияния параметров режимов резания на шероховатость поверхности. Представлены результаты исследования, на основании которых сделаны выводы о зависимости различных параметров резания на качество поверхностного слоя, определены нюансы токарной обработки рассматриваемого композиционного материала, даны практические рекомендации, которые положительно повлияют на время и успешность внедрения изготовления деталей из данного композиционного материала.

Ключевые слова: композиционные материалы, токарная обработка, режимы резания, терморасширенный графит, шероховатость поверхности

Для цитирования

Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В. Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 162–171. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

© Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Analysis of the influence of cutting conditions on the roughness of the surface layer when machining a composite material based on thermally expanded graphite

Ivan S. Mikheenko, Anatoly A. Smelik, Semen A. Yegorov✉,
Vladislav V. Chernyak

Military Innovative Technopolis ERA,
41 Pionersky Ave., Anapa, 353456, Russian Federation
✉ E-mail: columbia1996@mail.ru

Article history

Received: August 02, 2020

Revised: September 31, 2020

Accepted: November 04, 2020

Abstract. The current trend of replacing metal alloys with composite materials in the manufacture of various types of plain bearings, sealing elements of Assembly units, anti-friction bushings, and other machine parts is very promising for the development of many industries. However, in the manufacture of composite material products by modern methods, such as extrusion, pressing, and injection molding, various types of defects characteristic of these types of processing occur, resulting in the required parameters of the quality of the working surfaces of parts are not provided. This leads to the need for additional mechanical processing the quality of which largely depends on the reliability and durability of the functioning of parts and mechanisms. The article analyzes the main parameters that affect the quality of the surface obtained during turning for metal alloys, as well as for composite materials. The method of obtaining blanks by pressing from the material under consideration was developed, the technological equipment necessary for the research was designed and manufactured, a plan was developed for conducting a full-factor experiment with the creation of a model in the Mathcad program, and an active experiment was carried out to determine the influence of cutting mode parameters on surface roughness. Given the results of the study on the basis of which conclusions about the dependence of various cutting parameters on the quality of the surface layer, defined by the nuances of turning the considered composite material, practical recommendations that will positively affect the timing and success of implementation of fabrication of parts from this material.

Keywords: composite materials, turning, cutting modes, thermally expanded graphite, surface roughness

For citation

Mikheenko IS, Smelik AA, Yegorov SA, Chernyak VV. Analysis of the influence of cutting conditions on the roughness of the surface layer when machining a composite material based on thermally expanded graphite. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):162–171. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

Введение

Спектр специфичных свойств, которыми обладают композиционные материалы (КМ), объясняет значительное отличие процессов их механической обработки от резания металлических сплавов, но при этом на производительность, а также эффективность процесса оказывают значительное влияние режимы обработки, геометрия режущего инструмента. Зачастую при определении оптимальных параметров, характеризующих процесс резания, для достижения максимальной возможной производительности и требуемого качества

поверхностного слоя возникают затруднения ввиду недостаточных данных в литературе и опыта обработки традиционных конструкционных материалов.

Таким образом, повышение эффективности механической обработки композиционных материалов является актуальной задачей, так как при ее решении удастся повысить качественные характеристики изготавливаемой продукции, снизить себестоимость ее изготовления, а также значительно увеличить номенклатуру изделий из данных материалов.

1. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности металлов

На качество обработанной поверхности, в частности шероховатость, деталей влияют многие технологические факторы. При лезвийной обработке проявляется влияние режимов, используемый режущий инструмент, схема обработки на направление, форму, величину неровностей. Наиболее существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывают такие параметры режимов резания, как подача и скорость резания. Наличие таких дефектов, как налипание на режущий инструмент обрабатываемого материала, выкрашивание слоев детали, расположенных под режущей кромкой инструмента, выламывание частиц, характерных для хрупких материалов, определяет скорость резания.

Наиболее высокие параметры шероховатости достигаются при скорости резания порядка 15...30 м/мин. Этот эффект происходит по причине налипания материала на переднюю поверхность резца — наростообразования. При увеличении скорости вращения шпинделя наростообразование прекращается из-за повышения температуры в зоне резания и величина шероховатости уменьшается. Для материалов не склонных к наростообразованию, более хрупких, скорость главного движения резания не влияет на величину шероховатости [1].

При достаточной жесткости глубина срезаемого слоя не оказывает существенного влияния на величину микронеровностей. Глубина должна обеспечивать полное снятие дефектного слоя от предыдущего метода обработки детали или заготовки.

Существенное влияние при механической обработке на шероховатость оказывают структура и свойства обрабатываемой поверхности. Пластичные, более вязкие, такие как обычные малоуглеродистые стали, материалы после обработки обладают относительно высокими параметрами шероховатости. Более хрупкие, твердые материалы выходят после обработки с более «чистой» поверхностью. Это связано с отсутствием эффекта наростообразования. После механической обработки автоматные стали, с повышенным содержанием серы, а также материалы с присадкой свинца, имеют более высокий класс шероховатости, нежели углеродистая сталь, обработанная в одинаковых с ними условиях [2].

Подача — параметр режима резания, определяющий производительность процесса обработки. При назначении подачи на чистовых проходах опираются на показатель шероховатости, требующийся согласно конструкторской документации. При повышении подачи шероховатость растёт, точность обработанной поверхности падает ввиду роста температуры в зоне резания, увеличения силы резания, роста контактных напряжений. Помимо ухудшения качества поверхностного слоя, при увеличении подачи без снижения скорости резания негативно сказывается на стойкости режущего инструмента [3].

2. Резание полимерных композиционных материалов

Одним из основных параметров, определяющим процесс резания, является глубина резания, припуск на механическую обработку. Геометрическая точность размеров, качество поверхностного слоя, технологические условия обработки изделий — основные исходные данные для назначения глубины резания. При достаточной жесткости системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь) величина снимаемого слоя материала не влияет на шероховатость обработанной детали, но при значительном увеличении припуска качество поверхности ухудшается [4].

При выполнении литературного [4; 5; 6] обзора было установлено, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает подача режущего инструмента. Как и при обработке металлов и сплавов композиционные материалы, в том числе пластмассы, имеют большее количество поверхностных дефектов при увеличении подачи. Наиболее оптимальный вариант при точении уже исследованных образцов полимеров достигается при подаче, не превышающей 0,18—0,24 мм/об. При дальнейшем увеличении данного параметра наблюдается резкое ухудшение качества поверхностного слоя. Такие режимы резания могут быть назначены только для предварительного, чернового точения.

При проведении исследований по выявлению зависимости скорости вращения шпинделя на шероховатость [7] было выявлено, что данный параметр не оказывает значительного влияния. Высота микронеровностей находится в диапазоне одного класса

шероховатости. Но учитывая резкое различие свойств композиционных материалов, температурный фактор, сопровождающий процесс стружкообразования, существуют диапазоны скоростей резания, где шероховатость будет принимать максимальные и минимальные значения. Графики на рис. 1, 2 показывают зависимости скорости резания на шероховатость поверхностного слоя различных перспективных образцов материалов.

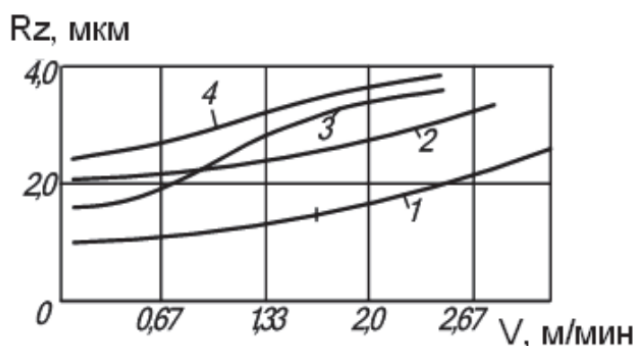


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности стеклопластика от скорости резания: 1 – точение; 2 – фрезерование поперечное; 3 – сверление; 4 – фрезерование продольное

Figure 1. Dependence of the surface roughness of fiberglass on the cutting speed: 1 – turning; 2 – transverse milling; 3 – drilling; 4 – longitudinal milling

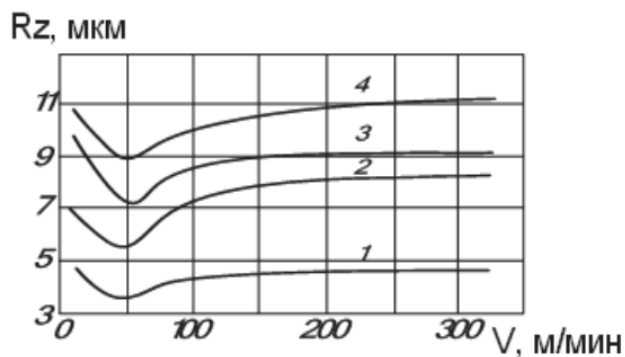


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности скорости резания: 1 – органическое стекло; 2 – волокнит К-21–22; 3 – волокнит К-18–2; 4 – текстолит

Figure 2. Dependence of the roughness of the processed surface of the cutting speed: 1 – organic glass; 2 – fiber K-21–22; 3 – fiber K-18–2; 4 – textolite

3. Свойства и структура обрабатываемого материала

Графит представляет собой паркетный полимер, построенный из расположенных в одной плоскости атомов углерода [8]. Слоистой структурой обусловлена анизотропия свойств графита [9], склонность к охрупчиванию, также это объясняет, почему так легко можно поместить атомы или молекулы между слоями углерода. Согласно идеализированной кристаллической структуре, предложенной Берналом, атомы углерода в каждом слое располагаются точно над центром правильных гексагонов в соседнем верхнем слое [3; 8].

Терморасширенный графит (ТРГ) — материал, получаемый путем термического удара интеркалированных соединений графита. Процесс интеркалирования сводится к внедрению молекул и ионов серной кислоты в присутствии окислителя.

В промышленных условиях ТРГ в основном получают из пропитанного серной, азотной кислотой или их смесью чешуйчатого графита, который проводится через пламя печи. Происходит мгновенное испарение интеркалита, из-за чего интеркалированные чешуйки начинают крайне сильно и неконтролируемо расширяться. Получается состоящая из графитовых «червячков» разновидность «черного снега» (рис. 3), при этом ТРГ представляет собой углеродные пеноструктуры [10; 12].

Высокое сжатие ТРГ происходит при прокатывании, когда чешуйки ТРГ цепляются друг за друга изогнутыми сетками, между ними возникают связи Ван-дер-Ваальса, и после прокатки получается довольно прочный и гибкий лист или нить. Главное их достоинство — упругость [11; 12].

Терморасширенный графит обладает высокой химической стойкостью в большинстве сред, кроме сильных окислителей (в первую очередь, таких как олеум, концентрированные кислоты: серная, азотная и хромовая) при температурах: до 3000 °С — в инертной атмосфере, до 650 °С — на пару, до 550 °С — на воздухе, от –240 до +350 °С — в кислороде и т.д.; высокими упругими характеристиками: модуль Юнга при сжатии — от 100 до 200 МПа (на практике наблюдается зависимость от плотности); газопроницаемость перпендикулярно поверхности прокатки близка к нулю

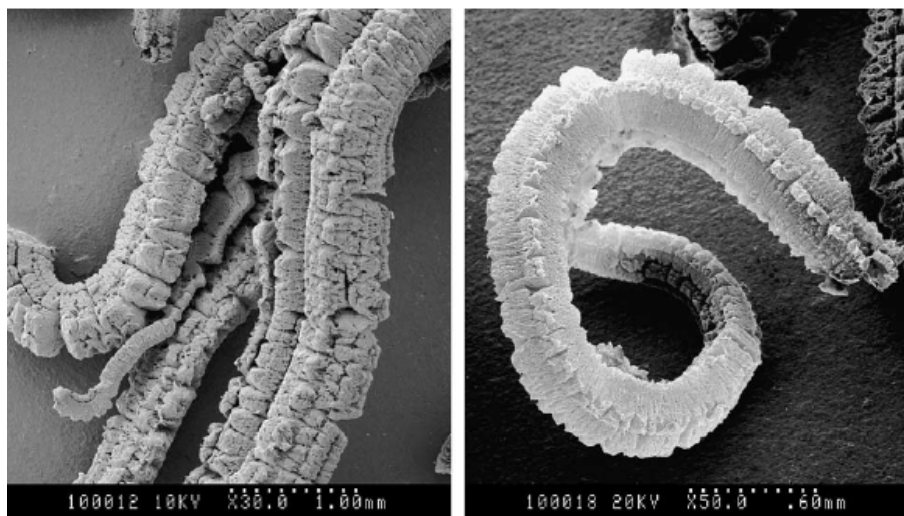


Рис. 3. Строение отдельных червячков ТРГ

Figure 3. Structure of individual worms of thermally expanded graphite

(порядка $10\text{--}6\text{ см}^3\cdot\text{см}/\text{см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{атм. азота}$); электропроводность порядка $105\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ [9; 12].

4. Получение образцов из композиционного материала на основе терморасширенного графита

Для проведения эксперимента по выявлению зависимости режимов резания на качество поверхностного слоя поверхности при обработке заготовок из КМ на основе ТРГ стоит задача получить образцы, габаритные размеры которых будут подходить для закрепления в токарном станке и обработки на длине, необходимой для оценки шероховатости.

На первом этапе КМ, находящийся в состоянии «черного снега» или «пуха», подлежит измельчению для получения требуемой насыпной плотности (примерно $14\text{ кг}/\text{м}^3$). Режимы и методика измельчения производится из результатов экспериментальных исследований (время измельчения 90 с. с периодически перемешиванием материала) [11].

Согласно исследованию [12] при увеличении времени измельчения насыпная плотность не увеличивается, размеры частиц графита не уменьшаются. Для измельчения использовалось устройство с гладкими спиралеобразными элементами (рис. 4).

Устройство, изображенное на рисунке, состоит из бункера 1, в который засыпается ТРГ, и двух спиралеобразных элементов 2.

В измельченный ТРГ добавляется кремнийорганическое связующее в пропорции 80 % ТРГ и 20 % связующего, далее перемешивается 30 мин по принципу «пьяная бочка». Экспериментальные данные, представленные в работе [12] показали, что данные пропорции, метод и время смешивания, а также продолжительность и способ измельчения обеспечивают наилучшие физико-механические свойства полученных из данного материала образцов.

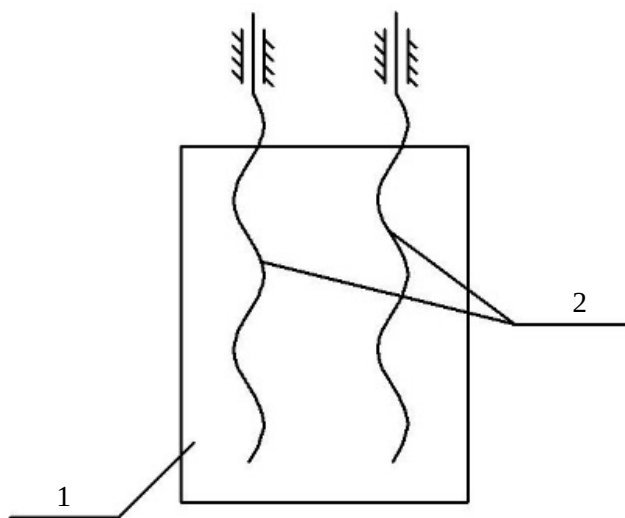


Рис. 4. Измельчитель

Figure 4. Shredder

Перемешанную смесь ТРГ и кремнийорганического связующего необходимо спрессовать с использованием специально собранной оснастки (рис. 5).

Оснастка состоит из двух труб 1, общая длина которых примерно 2,5 метра, диаметр отверстия 16 мм, разрезной втулки 2, соединяющей эти трубы. С одной стороны в трубу запрессовывается заглушка 5 с другой — засыпается смесь ТРГ с кремнийорганическим связующим и спрессовывается поршнем 3.

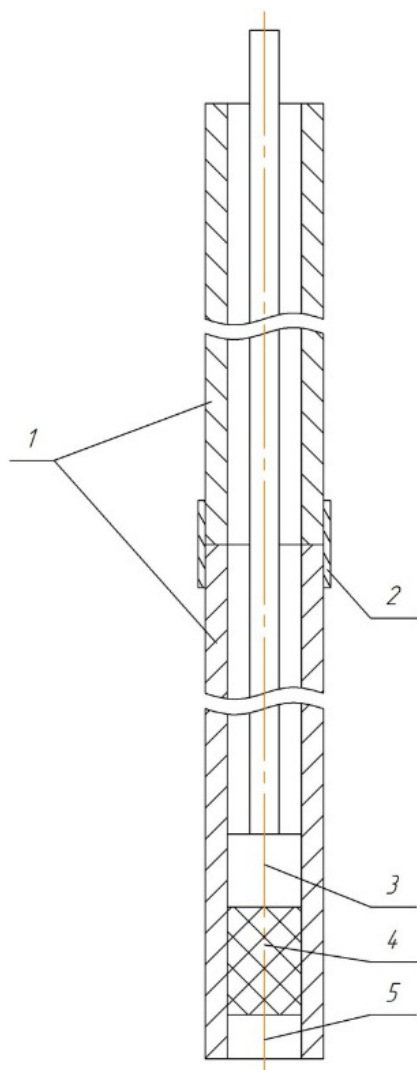


Рис. 5. Эскиз оснастки для прессования образцов
Figure 5. Sketch of equipment for pressing samples

Полученные образцы нагреваются в электрической печи СШОЛ со скоростью 1 °С/мин до температуры

200±10 °С и выдерживаются при этой температуре в течение 30 мин, а затем остывают вместе с печкой благодаря и придаются все свойства данного материала.

5. Методика проведения эксперимента

Эксперимент заключается в точении образцов из КМ на основе ТРГ при различных режимах, выбранных исходя из литературного обзора и результатов предварительных экспериментов, с целью установления зависимости каждого из параметров на показатель шероховатости обрабатываемой поверхности.

Эксперимент будет проводиться на универсальном станке 16К20, имеющем возможность закрепления резца с тензометрическим датчиком. Резец с тензометрическим датчиком был ранее протарирован при разработке компьютерной системы измерения силы резания. От тензометрического датчика выходной сигнал к тензостанции передается через провода, также ограничивающие выбор оборудования для проведения эксперимента.

Было принято решение зажимать образцы в специальной оснастке, действующей по принципу цангового патрона, установленную в трехкулачковый патрон, для исключения местных нагрузок и, как следствие, разрушения заготовок.

После закрепления образцов перед точением на режимах, выбранных для проведения эксперимента, выполняем проточку каждого образца до $\varnothing 15 \pm 0,05$ для обеспечения повторяемости, минимизации погрешности, связанной с разной геометрией, биением образцов.

Контроль шероховатости на обработанных образцах будет производиться при помощи профилографа MarSurf Perthometer S2. Прибор предназначен для измерения и оценки параметров шероховатости поверхности различных машиностроительных и приборостроительных деталей с точностью до 0,8 нм. Профилограф позволяет оценивать параметры шероховатости по ГОСТ 2789—73, а также по ISO 3274.

6. Планирование экспериментальных исследований

Планирование эксперимента — это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной

задачи с требуемой точностью. Поиск оптимальных условий является одной из наиболее распространенных научно-технических задач [13].

В качестве параметров оптимизации была принята шероховатость поверхности, измеряемая параметром Ra (мкм), оказывающим существенное влияние на качество поверхности детали, ее функциональные возможности, производительность и экономичность процесса обработки.

Для исследования выбраны следующие факторы:

V — обороты шпинделя, об./мин;

S — подача инструмента, мм/об.;

t — глубина резания, мм.

Выходным параметром является шероховатость получаемой поверхности в Ra. Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кодирование факторов		
Encoding factors		
Наименование и обозначение факторов Name and designation of factors	Уровни варьирования Variation levels	
	-1	1
X_1 – обороты шпинделя, об./мин Spindle speed, rpm	125	800
X_2 – подача инструмента, мм/об. Tool feed, mm/rpm	0,05	0,1
X_3 – глубина резания, мм Cutting depth, mm	0,3	0,5

Table 1

Проводится эксперимент типа 2^3 , где число факторов $k=3$, число уровней $p=2$, число опытов $N=8$, 9 эксперимент среднее значение для проверки зависимости.

В табл. 2 сведены режимы, на которых будут обрабатываться образцы согласно плану эксперимента.

Таблица 2

План эксперимента

The experiment plan

Номер образца Sample number	Режимы обработки Processing mode		
	V , об./мин rpm	S , мм/об. mm/rpm	t , мм mm
1	125	0,1	0,5
2	800	0,05	0,5
3	800	0,1	0,5
4	125	0,05	0,5
5	125	0,1	0,3
6	125	0,05	0,3
7	800	0,1	0,3
8	800	0,05	0,3
9	500	0,075	0,4

Table 2

После расчета в программе Mathcad получаются следующие графики зависимостей измеренного параметра — шероховатости поверхности от заданных входных параметров (рис. 6–8).

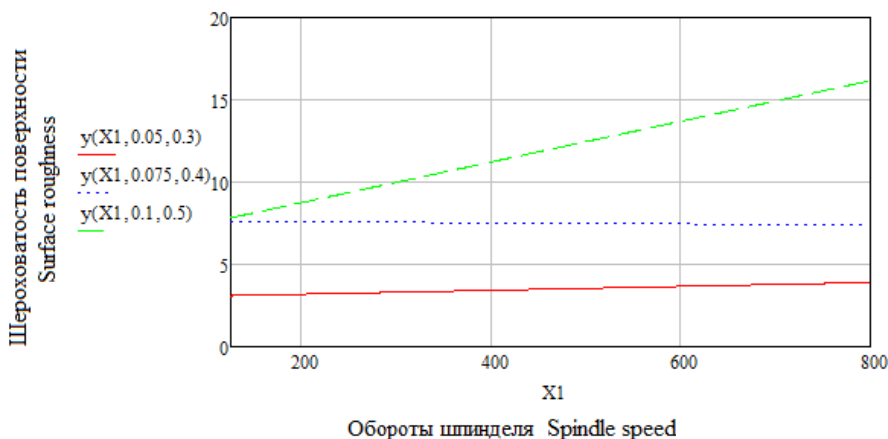


Рис. 6. График зависимости оборотов шпинделя на шероховатость обрабатываемой поверхности

Figure 6. Graph of the dependence of the spindle speed on the roughness of the treated surface

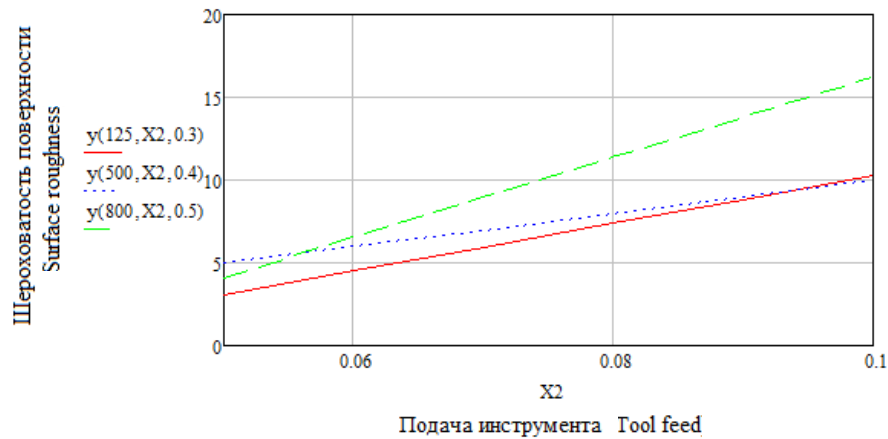


Рис. 7. График зависимости поддачи инструмента на шероховатость обрабатываемой поверхности
 Figure 7. Graph of the dependence of the tool feed on the roughness of the treated surface

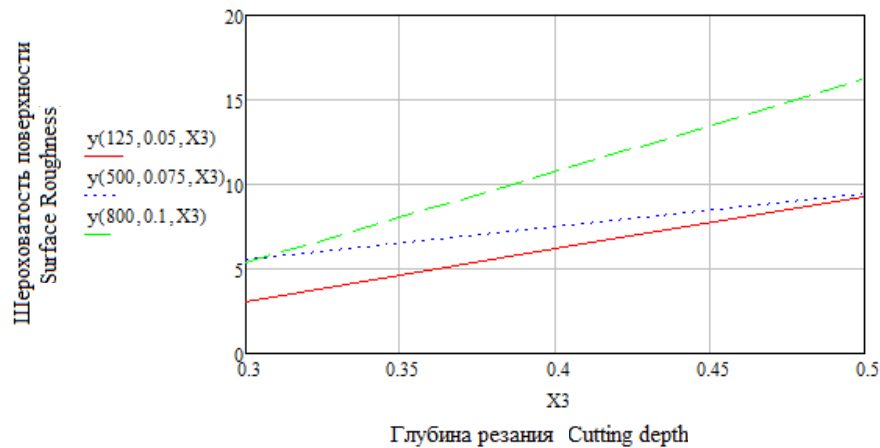


Рис. 8. График зависимости глубины резания на шероховатость обрабатываемой поверхности
 Figure 8. Graph of the dependence of the cutting depth on the roughness of the treated surface

7. Результаты экспериментальных исследований

Анализируя результаты контроля шероховатости на профилометре и при визуальном рассмотрении обработанной поверхности образцов, а также результаты обработки полученных данных (рис. 6–8), можно сделать следующие выводы:

1. На шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывает подача. При увеличении поддачи шероховатость увеличивается, количество видимых на поверхности дефектов увеличивается, возрастает вероятность разрушения материала.

2. Следующий по влиянию на качество поверхностного слоя параметр — это глубина резания. Как

и у большинства материалов при увеличении срезаемого слоя шероховатость возрастает в связи с тем, что сила резания и, как следствие, нагрузка на обрабатываемый образец возрастает, а, как показали результаты экспериментов, заготовки из данного материала очень плохо сопротивляются силе, действующей перпендикулярно оси вращения. Другими словами, вероятность поломки обрабатываемой заготовки сильно увеличивается при возрастании радиальной составляющей силы резания.

3. Скорость практически не влияет на качество обрабатываемой поверхности, но результаты эксперимента показали, что при обработке на наибольшей глубине и подаче шероховатость увеличивается

пропорционально увеличению скорости вращения шпинделя.

Заключение

Исследован процесс точения КМ на основе ТРГ. Получены зависимости качества поверхностного слоя от режимов, на которых производится механическая обработка. Определены следующие основные рекомендации, которые положительно повлияют на время и успешность внедрения изготовления деталей изданного материала:

- зажим заготовки необходимо осуществлять только по достаточной площади поверхности (в приспособлениях типа цангового патрона) или в специальных приспособлениях, усилие зажима которых направлено вдоль оси вращения детали;
- для достижения шероховатости более высокого класса, чем полученная в ходе выполнения эксперимента, рекомендуется уменьшать подачу инструмента, а также использовать инструмент с радиусом при вершине, позволяющим снимать меньшую толщину срезаемого слоя;
- при конструировании деталей из данного материала следует учитывать, что вероятность удачного изготовления деталей, обладающих малой жёсткостью мала. Наиболее технологично обосновано будет изготовление из данного материала деталей типа «Кольцо», «Уплотнение», «Седло» и подобной конфигурации.

Список литературы

1. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. 411 с.
2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость профиль. Международный опыт / под ред. Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2007. 136 с.
3. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе М.: Аспект-пресс, 1997. 717 с.
4. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 192 с.
5. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. 176 с.
6. Семко М.Ф., Дрожжин В.И. Обработка резанием электроизоляционных материалов. М.: Энергия, 1974. 174 с.
7. Дрожжин В.И., Сустан П.И. Качество обработ-

ки и прочность слоистых пластиков // Станки и инструменты. 1969. № 10. С. 15—16.

8. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: Сайнс-Пресс, 2007. 194 с.

9. Белова М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 42—49.

10. Черныш И.Г., Бурая И.Д. Исследование процесса окисления графита раствором бихромата калия в серной кислоте // Химия твердого топлива. 1990. № 1. С. 123—127.

11. Караваев Д.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Трошков К.В. Определение насыпной плотности терморасширенного графита // Известия Самарского научного Центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 360—362.

12. Караваев Д.М. Композиционные материалы на основе терморасширенного графита для эксплуатации при температурах до 500 °С: дис. ... к.т. н.: 05.16.06. 2016. 151 с.

13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. С. 84—90.

References

1. Ryzhkin AA, Shuchev KG, Klimov MM. *Obrabotka materialov rezaniyem [Processing of materials by cutting]*. Rostov na Donu: Feniks Publ., 2008. (In Russ.)
2. Tabenkin AN, Tarasov SB, Stepanov SN. *Sherokhovatost', volnistost' profil'. Mezhdunarodnyy opyt / Pod red. kand. tekhn. nauk NA Tabachnikovoy*. Saint Petersburg: IzdvoPolitekhn. un-ta; 2007. (In Russ.)
3. Fialkov AS. *Uglerod, mezhsloroyevyye soyedineniya i kompozity na yego osnove [Carbon, interlayer compounds and composites based on it]*. Moscow: Aspekt-press Publ.; 1997. (In Russ.)
4. Kobayashi A. *Obrabotka plastmass rezaniyem [Machining of plastics cutting]*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1974. (In Russ.)
5. Stepanov AA. *Obrabotka rezaniyem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov [Cutting of high-strength composite polymer materials]*. Leningrad: Mashinostroyeniye. Publ.; 1987. (In Russ.)
6. Semko MF, Drozhzhin VI. *Obrabotka rezaniyem elektroizolyatsionnykh materialov [Machining of insulating materials]*. Moscow: Energiya; 1974. (In Russ.)
7. Drozhzhin VI, Sustan PI. *Kachestvo obrabotki i prochnost' sloistykh plastikov [Quality of processing and strength of layered plastics]*. *Stanki i instrument [Machines and tools]*. 1969;10:15—16. (In Russ.)

8. Meleshko AI, Polovnikov SP. *Uglerod, uglerodnyye volokna, uglerodnyye kompozity* [Carbon, carbon fibers, carbon composites]. Moscow: Sayns-Press Publ.; 2007. (In Russ.)
9. Belova MYu. Ot «chernogo mela» k uplotnениyam iz TRG [From “black chalk” to seals from TRG]. *Armaturostroyeniye*. 2008;1(52):42-49. (In Russ.)
10. Chernysh IG, Buraya ID. Issledovaniye protsessa okisleniya grafitа rastvorom bikhromata kaliya v sernoy kislote [Investigation of the process of graphite oxidation with a solution of potassium bichromate in sulfuric acid]. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid fuel Chemistry]. 1990;1:123–127. (In Russ.)
11. Karavayev DM, Makarova LYe, Degtyarev AI, Troshkov KV. Opredeleniye nasypnoy plotnosti termoras-shirennogo grafitа [Determination of bulk density of thermally expanded graphite]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN* [Proceedings of the Samara scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013;15,4(2):360-362. (In Russ.)
12. Karavayev DM. *Kompozitsionnyye materialy na osnove termorasshirennogo grafitа dlya ekspluatatsii pri temperaturakh do 500°S* [Composite materials based on thermally expanded graphite for operation at temperatures up to 500° C] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). 05.16.06. 2016. (In Russ.)
13. Adler YuP, Markova YeV, Granovskiy YuV. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experiment Planning in search of optimal conditions.]. Moscow: Nauka Publ.; 1976. p. 84-90. (In Russ.)

Сведения об авторах

Михеенко Иван Сергеевич, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: 1231vanya@mail.ru

Смелик Анатолий Анатольевич, младший научный сотрудник 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: general26rus2000@mail.ru

Егоров Семен Анатольевич, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: columbia1996@mail.ru

Черняк Владислав Владимирович, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: mchernak.com@inbox.ru

About the authors

Ivan S. Mikheenko, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: 1231vanya@mail.ru

Anatoly A. Smelik, Junior Researcher of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: general26rus2000@mail.ru

Semen A. Yegorov, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: columbia1996@mail.ru

Vladislav V. Chernyak, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: mchernak.com@inbox.ru