

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 5, июнь, 2017.

Серия «Технические науки»

---

*Учредитель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор журнала* Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

*Заместитель главного редактора журнала* Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

#### Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Редактор текстов на английском языке

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации технического сервиса учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девоино Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государ-

ственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры деталей машин Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

*Адрес редакции:*

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by .

*Подписные индексы:* 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

*В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включѳн в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-1/2016.*

*Издатель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

*Выходит на русском, белорусском и английском языках.*

*Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.*

*Заведующий редакционно-издательским отделом С. А. Березнюк*

*Технический редактор А. Ю. Сидоренко*

*Компьютерная вѳстка С. М. Глушак*

*Корректор С. А. Березнюк*

Подписано в печать 12.06.2017. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,50. Уч.-изд. л. 7,60. Тираж 75 экз. Заказ 1325.

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Дечко М. М., Сенчуров Е. В.</b> Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности . . . . .	10
<b>Алифанов А. В., Богданович И. А., Малеронок В. В.</b> Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства . . . . .	18
<b>Алифанов А. В., Милюкова А. М., Бурносов Н. В., Толкачева О. А.</b> Повышение прочностных характеристик порошковой титановой бронзы . . . . .	25
<b>Голубев В. С., Гуринович В. И., Романчук И. А.</b> Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения ее эффективности . . . . .	31
<b>Горчанин А. И., Милюкова А. М.</b> Исследование ножей, упрочненных магнитно-импульсной обработкой, для резки сахарной свеклы . . . . .	37
<b>Грищенко Л. С., Иванова Н. П., Матыс В. Г., Ашуйко В. А.</b> Ингибиторная защита горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащих средах . . . . .	43
<b>Милюкова А. М., Горчанин А. И., Бурносов Н. В., Михлюк А. И.</b> Определение режима магнитно-импульсного упрочнения дисков хлопкоочистительных машин . . . . .	49
<b>Попок Н. Н., Кузьмич Е. В., Черневич М. В.</b> Сверление комбинированного металлостеклополимерного материала . . . . .	56
<b>Попок Н. Н., Кунцевич И. П., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Гвоздь Г. И.</b> Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали . . . . .	71
<b>Русан С. И.</b> Нетрадиционный метод силового анализа статически неопределимых систем с жестким объектом . . . . .	78
<b>Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л.</b> Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибро-валкового измельчителя . . . . .	87

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Клочков А. В., Ковалевский В. Ф.</b> Результаты испытаний пружинно-пальцевых активаторов клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна . . . . .	93
---	----

УДК 621.91.01/02:678.5

**Н. Н. Попок, Е. В. Кузьмич, М. В. Черневич**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (214) 59 18 85, rorectt@mail.ru

## СВЕРЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТАЛЛОСТЕКЛОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрены методика и результаты исследования характеристик процесса сверления отверстий в изделиях из комбинированного металлостеклополимерного и стеклополимерного материалов. Описаны возможные схемы обработки и применяемые при этом режущие инструменты и оснастка. Проведены рекомендации по технологическому регламенту обработки материалов.

**Ключевые слова:** металлостеклополимерный материал; сверление; сверло; производительность; деформация; температура; шероховатость; износ.

Рис. 17. Табл. 4. Библиогр.: 11 назв.

**N. N. Popok, E. V. Kuzmich, M. V. Chernevich**

Polotsk State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 29 Blokhina Str., 211440 Novopolotsk, Republic of Belarus, +375 (214) 59 18 85, rorectt@mail.ru

## DRILLING OF COMBINED METAL-GLASS-POLYMER MATERIAL

The methods and results of the study of the characteristics of the process of drilling holes in products made of combined metal-glass-polymer and glass-polymer materials are considered. Possible processing schemes, cutting tools and accessories are described. The recommendations on the technological procedure for materials processing are given.

**Key words:** metal-glass-polymer material; drilling; drill; performance of deformation; temperature; roughness; wear.  
Fig. 17. Tab. 4. Ref.: 11 titles.

**Введение.** В настоящее время все более широкое применение находят изделия из композиционных полимерных материалов [1; 2]. При изготовлении данных изделий используются различные методы обработки — от лазерной и гидроабразивной до механической обработки давлением и резанием [3—5]. Выбор метода обработки определяется требованиями по производительности и качеству, а также стоимостью реализуемого метода. Как правило, дорогостоящие методы, такие как лазерные и гидроабразивные, целесообразно использовать в условиях массового производства изделий и повышенных требований к качеству обработки. Обработка давлением, например штамповка, также требует применения дорогостоящих оборудования и оснастки. Наиболее целесообразным с точки зрения оптимального сочетания цены и качества и широко используемым методом является механическая обработка изделий резанием. В этом случае также используется широкая гамма инструментов — от лезвийных до алмазных, выбор которых определяется структурой и свойствами обрабатываемых материалов [6—8]. Требуется учитывать армирование волокон, состав материала и его физические свойства. В каждом конкретном случае в литературе не приводятся однозначных рекомендаций по выбору того или иного инструмента. Отсутствуют данные по обработке изделий, сочетающих композиционный полимерный материал и закаленную сталь. Поэтому актуальным является исследование механической обработки комбинированных материалов, включающих закаленную сталь и композиционный стеклопластиковый материал.

**Основная часть. Методика исследований, оборудование и аппаратура.** С целью всестороннего изучения процесса обработки комбинированного металлостеклопластикового и полимерного материалов и сопоставления результатов экспериментов предложена методика одновременного исследования формы и усадки стружки, температуры резания, изнашивания инструмента и качества обработанной поверхности. При этом использовались: 1) каркасы из комбинированного металлостеклопластикового и полимерного материалов (рисунок 1); 2) сверлильный станок модели 2Н 135; 3) специальная технологическая оснастка; 4) режущий инструмент; 5) пирометр OPTRIS LS; 6) измерительный комплекс «Абрис»; 7) инструментальный микроскоп БМИ-1Ц; 8) аналитические весы мод. ВЛА-200Г-Ц; 9) штангенциркуль DIGITAL CALIPER 0-150 мм 0,01; 10) амперметр Digi TOP AM-3.

Проведенный на портативном оптико-эмиссионном анализаторе PMI MASTER UVR спектральный анализ (фотоэлектрический метод) металлического материала каркаса показал, что химический состав материала близок к марке стали 35ХГСА твердостью 55 HRC (таблица 1).

Толщина металлического материала — +1,4 мм, толщина полимерного материала на стеклопластиковой основе — 4,6 мм. Применяется полимерный материал на стеклопластиковой основе плотностью  $110 \pm 5$  на 10 см со следующими механическими характеристиками: разрывная нагрузка не менее 3 800 Н, разрывное удлинение — 4%.

Специальное технологическое оснащение для обработки материалов на сверлильном станке (рисунок 2) включает кондуктор 1 и опорный (зажимной) элемент 2, обеспечивающие двухсторонний зажим обрабатываемого изделия и направление трубчатого сверла.

В качестве режущего инструмента использовались специальные сверла.

Представлены конструктивные и геометрические параметры сверла из твердого сплава марки ВК8 (рисунок 3), заготовка алмазного сверла (рисунок 4), сверла с подрезающими кромками (рисунок 5), трубчатые сверла (рисунок 6).



Рисунок 1. — Каркасы из металлостеклополимерного (а) и стеклополимерного (б) материалов

Таблица 1. — Результаты спектрального анализа металлического материала каркаса (химический состав, % масс.)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0,35	1,12	1,11	0,014	0,04	0,17	0,86	0,09	0,05	ост.

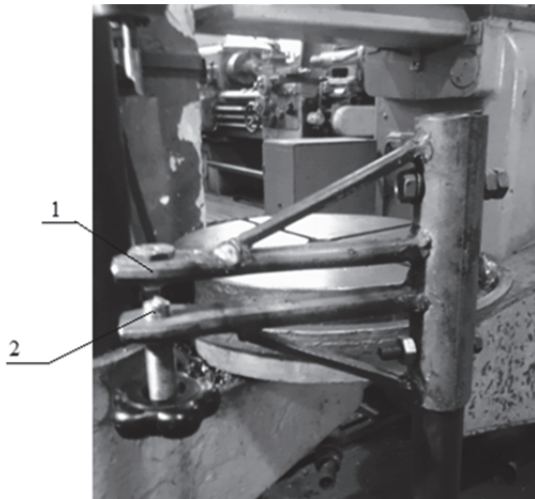


Рисунок 2. — Специальное технологическое оснащение

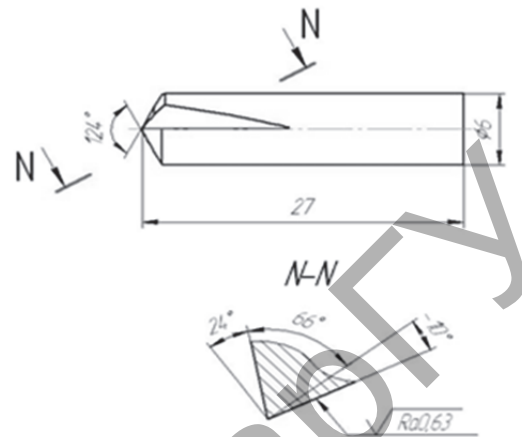


Рисунок 3. — Эскиз твердосплавного сверла

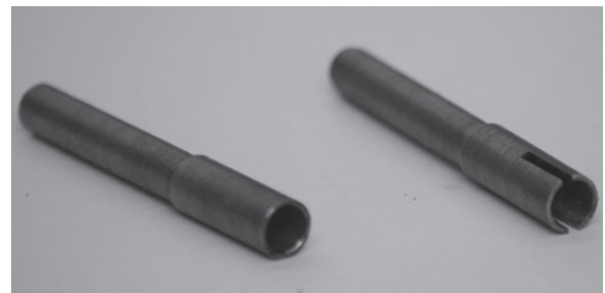
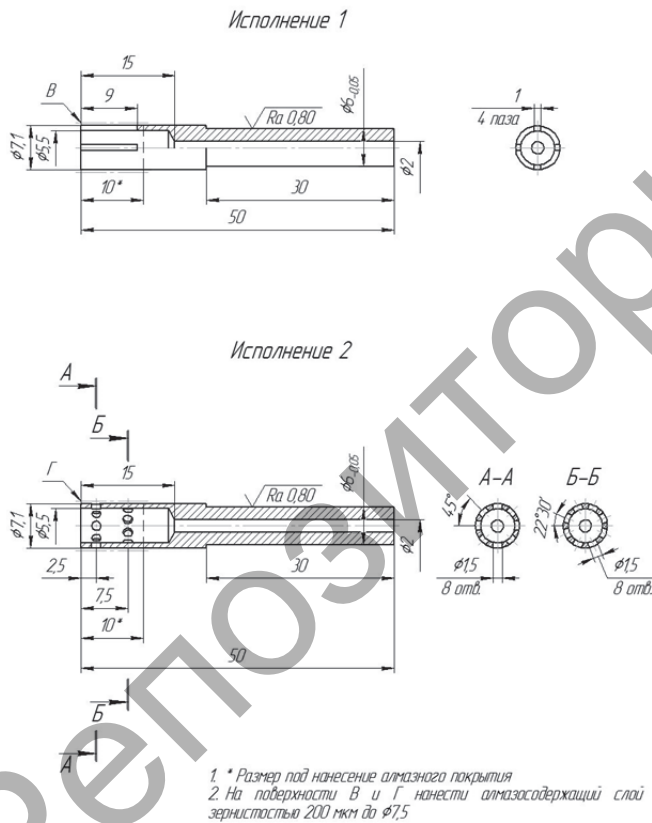


Рисунок 4. — Эскиз (а) и внешний вид (б) заготовки алмазного сверла

Количественно и качественно степень пластической деформации срезаемого слоя оценивалась коэффициентами усадки стружки по толщине и ширине:

$$k_a = a_1 / a; \quad k_b = b_1 / b,$$

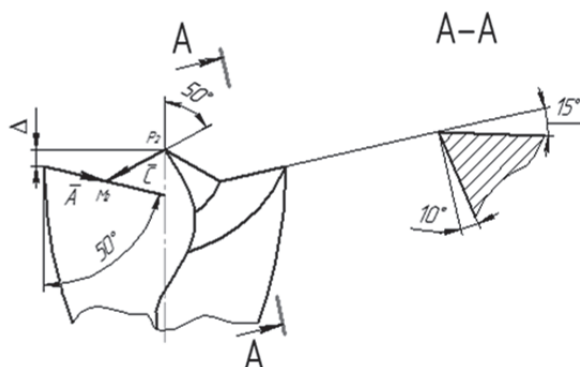


Рисунок 5. — Геометрия сверла с подрезающими режущими кромками

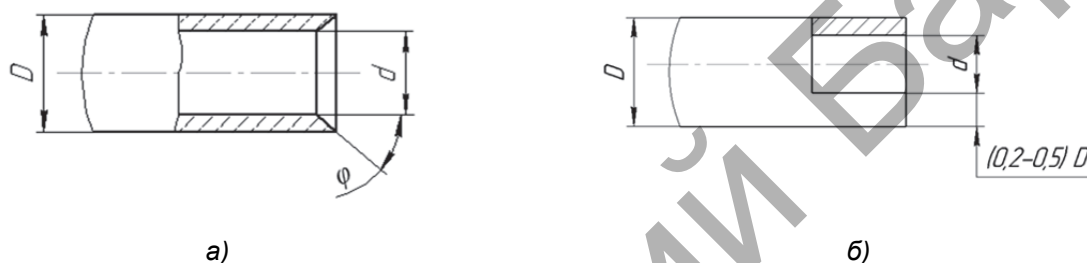


Рисунок 6. — Эскизы трубчатых сверл: с подточкой (а); лопаточное (б)

где  $a_1$ ,  $a$  — толщина стружки и срезаемого слоя соответственно;

$b_1$ ,  $b$  — ширина стружки и срезаемого слоя соответственно.

Толщина и ширина стружки измерялись, а толщина и ширина срезаемого слоя определялись по формулам

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}; \quad (1)$$

$$a = S_0 \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $t$  — глубина резания, мм;

$S_0$  — подача, мм / об.;

$\varphi$  — главный угол в плане, град.

Представим схему измерения температуры резания пирометром модели OPTIRIS LS (рисунок 7).

С целью определения зависимости температуры сверления от глубины и скорости резания использовались закладные пластинчатые термоэлектроды (рисунок 8).

Термоэлектроды в виде двух пластин из различных материалов (сталь, латунь) закладываются через изолирующие прокладки между металлом и стеклополимерным материалом каркаса. При сверлении материала происходит замыкание термоэлектродов сверлом. В цепи за счет температуры резания возникает термоэлектродвижущая сила, которая фиксируется амперметром [9]. Такая схема измерения обеспечивает постоянный контакт сверла с термоэлектродами и позволяет за один проход инструмента в движении подачи установить зависимость температуры от глубины  $t$  и скорости  $v$  резания.

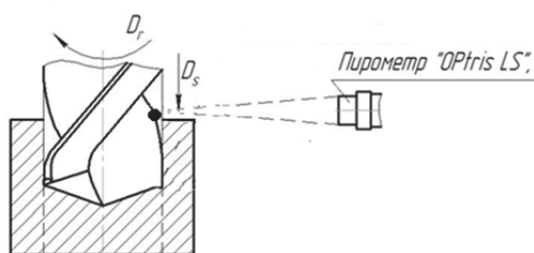


Рисунок 7. — Схема измерения температуры резания пирометром OPTRIS LS при обработке сверлом

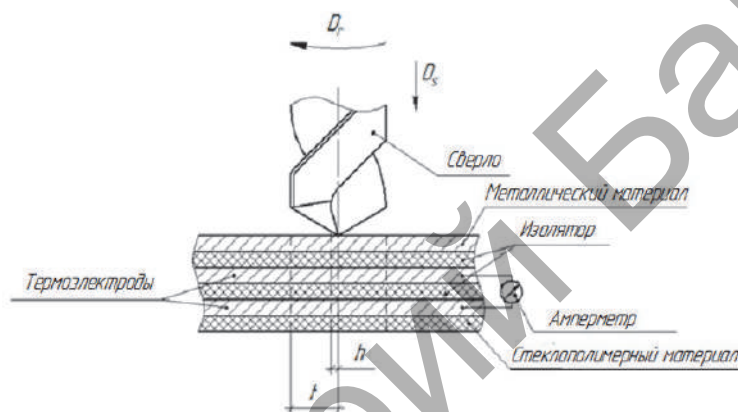


Рисунок 8. — Схема измерения температуры резания с использованием пластинчатых термоэлектродов

Исследования изнашивания режущего инструмента проводились по стандартной методике. Оценивался внешний вид износа режущего лезвия инструмента. В каждой серии опытов проводились необходимые измерения величины фаски износа лезвия инструмента на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц. По результатам измерений определялось влияние режима резания и геометрии инструмента на износ лезвия.

Измерение шероховатости проводилось на торцевой поверхности изделия «забрало», входящего в комплект каркаса. Использовалась методика измерений параметров шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rm$ ,  $S$ ,  $Sm$  и  $tp$  шуповыми приборами и процедуры для обеспечения правильных и сопоставимых результатов измерения шероховатости поверхности деталей при контроле производственного процесса и при приемочном контроле готовых изделий в соответствии СТ СЭВ 6461. Качество просверленного отверстия оценивалось визуально.

**Производительность обработки.** Как известно, производительность обработки резанием  $\Pi$  определяется количеством изготовленных деталей  $K_d$ , количеством обработанных конструктивных элементов  $K_{к.э}$ , площадью обработанных поверхностей  $F_p$ , объемом снимаемого слоя в движении подачи  $V_{сн}$ , отнесенных к единице времени  $T$ , и объемом срезаемого слоя за один цикл главного движения  $V_{ср}$ :  $\Pi = f(K_d K_{к.э} F_p V_{сн} V_{ср} T)$ .

Количество обработанных деталей и конструктивных элементов определяется соответствующим штучным временем  $T_{шт.д}$  и  $T_{шт.к.э}$  и вычисляется по формуле  $K_d = fT_{шт.д}$ ;  $K_{к.э} = fT_{шт.к.э}$  соответственно. В свою очередь штучное время вычисляется следующим образом:  $T_{шт} = T_0 + T_b$ , где  $T_0$  — основное время, мин;  $T_b$  — вспомогательное время, мин.

Площадь обработанной поверхности и объемы снимаемого и срезаемого материала определяются основным временем:  $F_{\text{п}}, V_{\text{см}}, V_{\text{ср}} = fT_0$ , где  $T_0 = \frac{L}{S_M} = \frac{l+l_1}{S_M}$ ,  $L$  — длина хода инструмента, мм;  $S_M$  — минутная подача, мм/мин;  $l$  и  $l_1$  — длина врезания и перебега соответственно, мм.

Время изготовления каркаса (операция сверления, штучное время  $T_{\text{шт.к}}$ ) затрачивается на 1) установку каркаса на опору; 2) установку кондуктора; 3) зажим (поджим опоры) каркаса; 4) установку, зажим и подвод сверла; 5) сверление (врезание и перебег, сверление); 6) вывод сверла; 7) отжим опоры; 8) поворот каркаса на очередное отверстие и далее повтор действий.

При обработке отверстий в каркасе возможны следующие схемы резания: 1) металлостеклополимерного материала — специальным сверлом (рисунок 9, а) и комбинированным сверлом (см. рисунок 9, б); 2) стеклополимерного материала — сверлом с подточкой (см. рисунок 9, в) и трубчатым сверлом, исполнение I трубчатым сверлом (см. рисунок 9, д) и исполнение II (см. рисунок 9, е), а также сверлом-лопаткой (см. рисунок 9, ж).

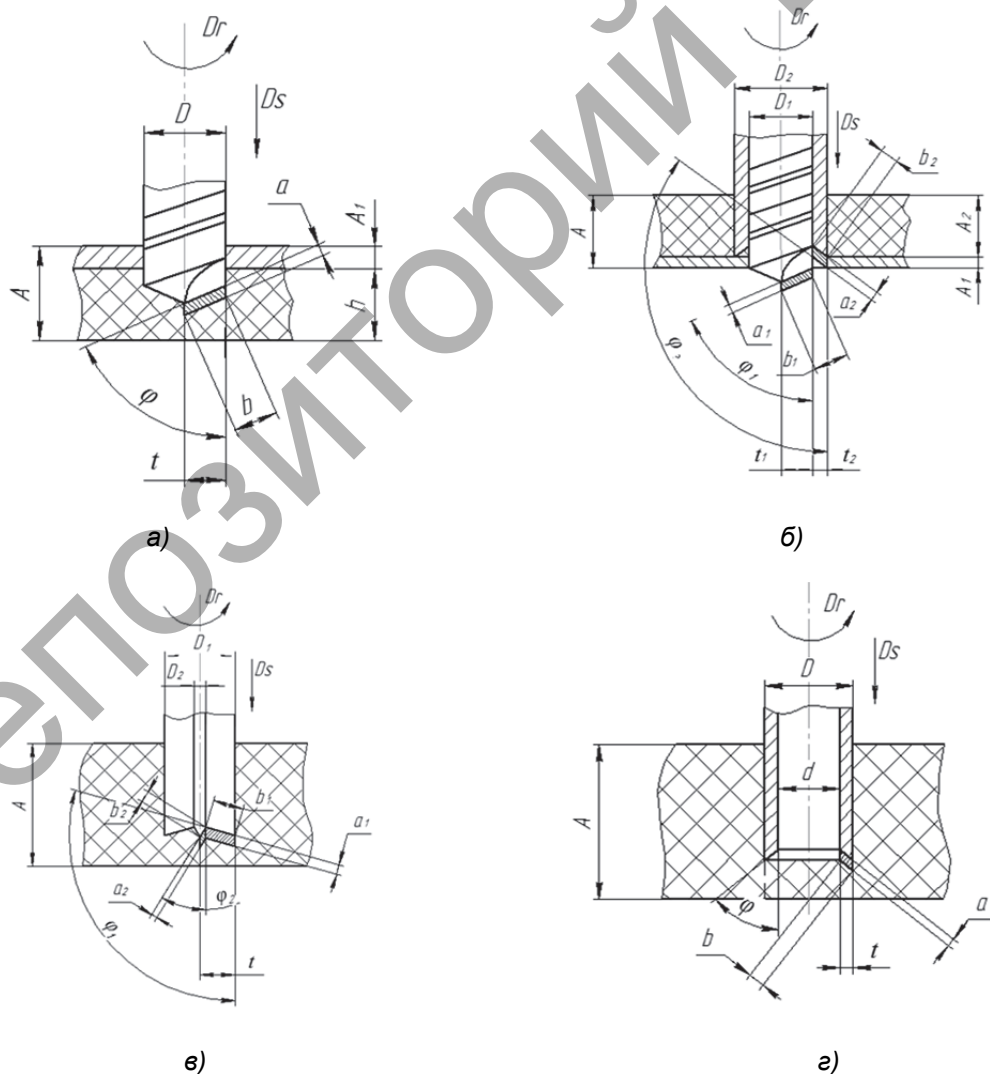


Рисунок 9. — Схемы обработки металлостеклополимерного и стеклополимерного материалов

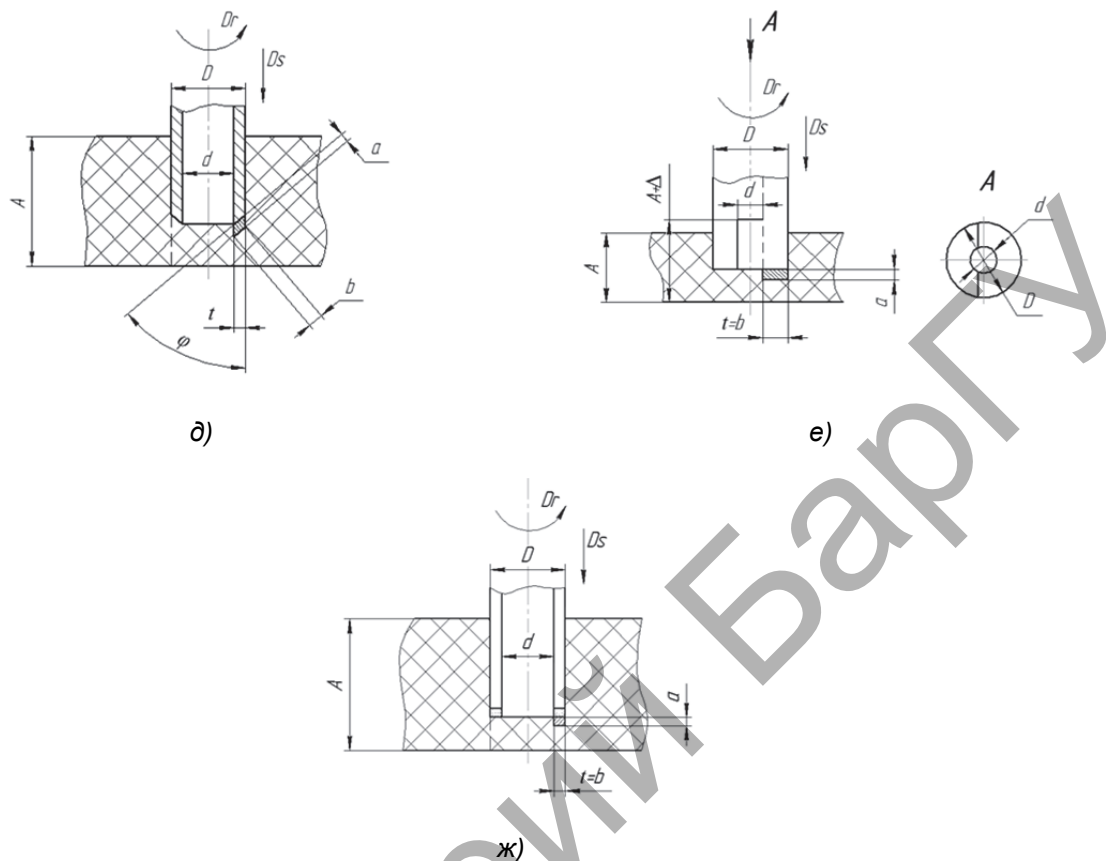


Рисунок 9. — Окончание

С учетом вышеизложенных представлений производительность срезания слоя материала для каждой схемы резания будет следующей:

$$\Pi_{\text{ср.1}} = \frac{V_{\text{ср}}}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{abl}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{ab\pi D}{1/n} = ab\pi Dn, \quad (3)$$

$$\Pi_{\text{ср.2}} = (\alpha_1 b_1 \pi D_1 + \alpha_2 b_2 \pi D_2) n; \quad (4)$$

$$\Pi_{\text{ср.3}} = (\alpha_1 b_1 \pi D_1 + \alpha_2 b_2 \pi D_2) n; \quad (5)$$

$$\Pi_{\text{ср.4, исп I}} = \alpha_1 b_1 (D_1 - 2) n; \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{ср.5, исп II-III}} = \alpha_1 b_1 \pi (D - d) n; \quad (7)$$

$$\Pi_{\text{ср.6}} = \alpha_1 b_1 \pi (D - d) n, \quad (8)$$

где  $\tau_{\text{ц}}$  — время цикла (одного оборота), мин;

$n$  — частота вращения сверла,  $\text{мин}^{-1}$ .

В случае обработки трубчатым сверлом необходимо учитывать получение диска (стержня) диаметром  $d$ , который необходимо включать в срезаемый и снимаемый слои, так как он будет определять производительность обработки (см. рисунок 9, з—ж).

Выводу получаемого диска или стержня из зоны резания способствует (см. рисунок 9, ж) вырезание части сверла вдоль оси (сверло-лопатка).

С учетом формул (1) и (2), в вышеприведенных формулах (3)—(8) геометрические параметры  $a$  и  $b$  могут быть заменены технологическими  $t$  и  $S_0$ , т. е.

$$\Pi = t \cdot S_0 \cdot \pi D n = t \cdot S_M \cdot \pi D, \text{ мм}^3 / \text{мин}$$

где  $S_M = S_0 n$  — минутная подача, мм / мин.

Производительность снятия слоя материала в движении подачи для всех схем резания будет определяться по формуле  $\Pi_{\text{сн}} = \frac{V_{\text{сн}}}{T_0} = \frac{\pi d^2 L}{4T_0}$ , мм<sup>3</sup> / мин, или через технологические параметры при  $T_0 = \frac{L}{S_M}$  и  $D = 2t$ ;  $\Pi_{\text{сн}} = \frac{\pi 4t^2 L S_M}{4L} = \pi t^2 S_M = \pi t^2 S_0 n$ .

Построим зависимость производительности обработки при изменении минутной подачи сверла (рисунок 10).

**Механико-физические характеристики процесса резания.** Производительность обработки зависит не только от геометрических и технологических параметров, но определяется деформацией срезаемого слоя, силами и температурой резания, которые влияют на износ и стойкость режущего инструмента и ограничивают производительность по скорости резания и площади срезаемого слоя. Другими словами, производительность различных схем резания должна быть оценена не только геометрическими и технологическими параметрами резания, но и физическими характеристиками процесса резания.

Сверление стеклопластиков имеет некоторые особенности процесса стружкообразования. Как известно [9], при обработке хрупких материалов в зависимости от сочетания режимов резания, конструктивно-геометрических параметров инструмента, физико-механических свойств заготовки может образовываться стружка трех типов: сливная, элементная и надлома. Однако при сверлении стеклопластика всегда присутствует определенное количество пылевидной стружки, которая образуется как в сочетании сегментной и сливной, так и стружки надлома.

В случаях применения трубчатых сверл с исполнениями I—III необходимо учитывать направление схода стружки. Например, желательное исполнение I (рисунок 11, а), так как в этом случае срезаемая стружка будет удалена через отверстие сверла. При исполнениях II и III (рисунок 11, б, в) сходу стружки будут препятствовать режущие кромки.

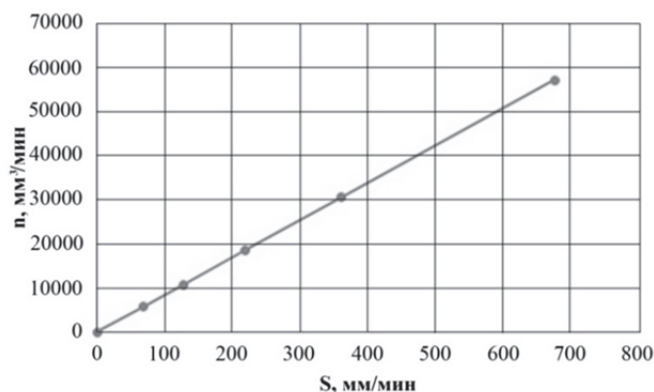
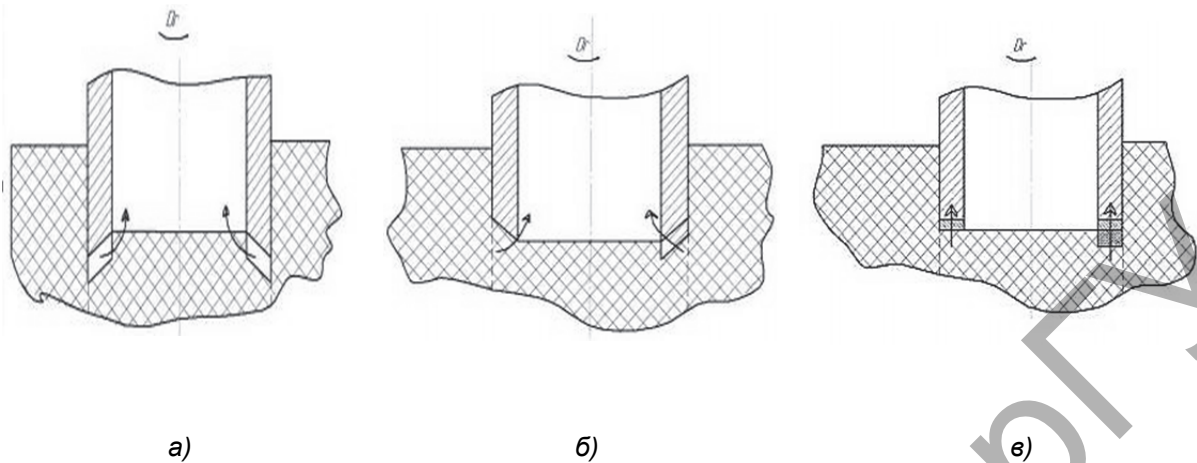


Рисунок 10. — Зависимость производительности обработки от подачи сверла



**Рисунок 11. — Схемы к определению направления схода стружки при резании трубчатыми сверлами в исполнениях I (а), II (б), III (в)**

Как известно [10], угол сдвига определяется следующим образом:

– при обработке металла — по формуле  $\beta_1 = \frac{C - \Theta + \gamma}{2}$ , где  $C$  — постоянный угол,  $C = 80^\circ$ ;  $\Theta$  — угол трения;  $\gamma$  — передний угол.

– при обработке стали 45 — по формулам  $f = 1,2 \div 3,0$  и  $\Theta = 48^\circ \div 71^\circ$ .

Например, при  $f = 1,6$ ,  $\Theta = 50^\circ$  и  $\gamma = -10^\circ$ , угол сдвига  $\beta_1 = 20^\circ$ .

Коэффициент усадки стружки вычисляется по формуле  $K = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} = 2,9$ .

Относительный сдвиг определяется следующим образом:  $\varepsilon = \frac{k_a^2 - 2k_a \cdot \sin \gamma + 1}{k_a \cdot \cos \gamma} = 2,9666$ .

Для определения усадки стружки при обработке металлостеклополимерного материала были произведены измерения толщины  $a_1$  и ширины  $b_1$  стружки при различных скоростях резания (таблица 2).

Расчетные значения толщины и ширины срезаемого слоя определялись по формулам (1) и (2):  $a = S_0 \sin \varphi = 0,132$  мм;  $b = t / \sin \varphi = 4,01$  мм.

**Т а б л и ц а 2. — Результаты измерения толщины  $a_1$  и ширины  $b_1$  стружки**

Номер опыта	$V$ , м/мин	$n$ , мин <sup>-1</sup>	Измеряемый параметр	Номер измерения					Среднее значение
				1	2	3	4	5	
1	8,55	450	$a_1$ , мм	0,08	0,09	0,19	0,17	0,09	0,12
			$b_1$ , мм	0,64	0,52	0,48	0,46	0,49	0,52
2	16,15	850	$a_1$ , мм	0,15	0,16	0,13	0,14	0,16	0,15
			$b_1$ , мм	0,56	0,59	0,74	0,63	0,58	0,62
3	27,74	1 460	$a_1$ , мм	0,08	0,09	0,19	0,22	0,18	0,15
			$b_1$ , мм	0,61	0,59	0,69	0,70	0,68	0,65
4	45,6	2 400	$a_1$ , мм	0,11	0,14	0,10	0,10	0,11	0,11
			$b_1$ , мм	0,60	0,65	0,71	0,59	0,63	0,64

Коэффициенты утолщения и уширения стружки определяются по следующим формулам соответственно:  $K_a = a_1 / a$ ,  $K_b = b_1 / b$ .

Полученные данные сведены в таблицу 3.

Как показывают результаты исследований и расчетов, значения коэффициента утолщения стружки  $K_a$  близки к 1, а значения относительного сдвига  $\varepsilon$  находятся в пределах 2, что свидетельствует о меньшей деформации труднообрабатываемого малопластичного материала по сравнению со сталью 45. В диапазоне значений частот вращения инструмента от 450 до 2 400 мин<sup>-1</sup> деформация изменяется незначительно.

Были проведены экспериментальные исследования температуры резания комбинированного материала при изменении частоты вращения сверла (таблица 4).

Приведен график зависимости температуры резания от частоты вращения сверла (рисунок 12).

Исходя из полученных данных, а также результатов исследований других авторов можно заключить, что теплота в объеме инструмента, стружки и детали распределяется неравномерно. При этом температурные деформации заготовки и инструмента снижают точность обработки. Темп роста температуры отстает от темпа роста скорости резания. Это объясняется тем, что при увеличении скорости резания большая часть тепла уносится стружкой. С увеличением подачи температура в зоне резания тоже повышается, но менее интенсивно, чем при увеличении скорости резания. С увеличением глубины резания температура в зоне резания повышается незначительно.

**Исследование изнашивания режущего инструмента.** Для управления процессом резания и обеспечения производительности обработки необходимо выяснить природу и закономерности изнашивания инструмента. Известно [9], что изнашивание инструмента при резании материала носит комплексный характер, т. е. абразивно-механическое, диффузионное, адгезионное, усталостное, химическое и другие виды изнашивания. Причем в зависимости от условий обработки преобладает тот или иной вид изнашивания, который и является определяющим.

Т а б л и ц а 3. — Данные исследования деформации срезаемого слоя

Номер опыта	$V$ , м / мин	$n$ , мин <sup>-1</sup>	Коэффициент утолщения, $K_a$	Относительный сдвиг, $\varepsilon$
1	8,55	450	0,91	2,09
2	16,15	850	1,14	1,88
3	27,74	1460	1,14	1,88
4	45,60	2400	0,83	2,20

Т а б л и ц а 4. — Результаты экспериментальных исследований температуры резания

Обороты, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Номер опыта					Ср.
	1	2	3	4	5	
	Температура резания, °С					
450	309	23	318	340	359	330
850	350	380	391	340	350	362
1460	403	446	437	441	420	429
2400	436	520	520	450	470	479
4500	420	509	482	475	420	461

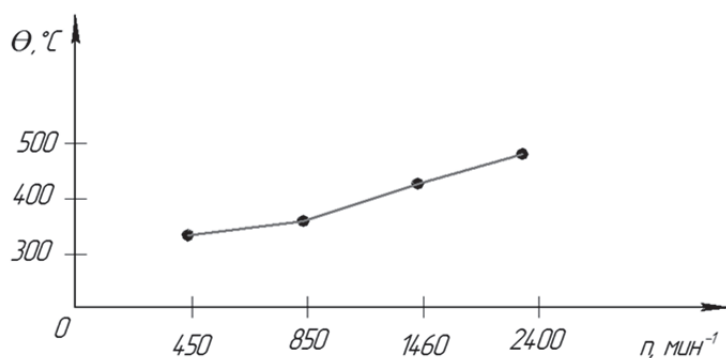


Рисунок 12. — Зависимость температуры резания от частоты вращения сверла

В работах [5; 6] отмечено, что диффузионный износ при нарезании резьбы в стеклопластиковых изделиях отсутствует, так как для этого необходимо повышение температуры более  $900^\circ\text{C}$ , в то время как в зоне резания она не поднимается выше  $600^\circ\text{C}$ . Наличие полимерного связующего и его деструкция приводят к появлению поверхностно-активных веществ в зоне резания, интенсифицирующих процесс изнашивания.

Армирующие волокна (в данном случае стеклянные) оказывают абразивное воздействие на режущий инструмент, и происходит истирание режущей поверхности (абразивно-механическое воздействие).

Адгезионный износ практически отсутствует, так как условиями для его возникновения являются сродство между инструментом и обрабатываемым материалом, высокое давление в зоне резания и пластические деформации. Разрушение пластика при резании носит упругий характер, что исключает возможность такого износа.

Предпосылкой химического износа является возможность химического взаимодействия полимера с металлом в мономолекулярном слое на границе раздела. Кроме этого возможен также водородный износ, возникающий при трении между инструментальным и обрабатываемым полимерным материалом. Возникающие при трении ионы водорода проникают в имеющиеся микротрещины. В зародышах трещин протоны водорода могут приобрести электроны и образовать атомы, а затем молекулы. Увеличиваясь в размерах, они с огромной силой распирают поверхности в месте дефекта. Трещины, сливаясь друг с другом, приводят к разрушению поверхностного слоя. Интенсивное изнашивание сверл при обработке высокопрочного материала обусловлено рядом причин, к числу которых относятся трение стружки и заготовки о поверхности инструмента, пластическая деформация и выкрашивание режущей кромки, абразивное воздействие армирующих волокон и т. д. В результате износа снижаются точность и качество обработки, особенно на входе и выходе сверла, а также производительность из-за частой смены инструмента. При сверлении сквозных отверстий в металлогластопластическом материале изнашивание сверла происходит по задней поверхности в виде фаски и округления режущей кромки. Причем изнашивание режущей кромки неравномерное, наибольший износ наблюдается у ленточек сверла (рисунок 13).



Рисунок 13. — Изношенное сверло

**Качество обработки.** Шероховатость поверхности зависит от большого количества факторов, к числу которых

относятся: свойства обрабатываемого материала, в частности, схемы армирования для композиционного полимерного материала, режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, износ инструмента, вид обработки, вибрации при резании и т. п. [11; 13]. Учет влияния всех перечисленных факторов сложен. Однако, если учесть, что производят обработку конкретного материала инструментом оптимальной геометрии, на определенном оборудовании, то количество влияющих факторов, определяющих уровень параметров шероховатости, можно свести к минимуму, так как к основным параметрам технологического процесса, определяющим параметры шероховатости, относятся режимы резания (скорость резания, подача и глубина резания).

При сверлении полимерного материала на стеклопластиковой основе характерно перерезание волокон как вдоль, так и поперек, что создает особые условия резания и предъявляет специальные требования к режущему инструменту. Происходит одновременное перерезание одной нити и сминание другой, перерезание смятой нити и смятие нити, которая будет в дальнейшем перерезана. Смятие нити приводит к разломачиванию поверхности (рисунок 14, а).

Если зажать ткань между двумя прижимами с использованием специального приспособления (см. рисунок 2), то это будет препятствовать смятию нити и она будет только перерезаться (см. рисунок 14, б).

Определялась шероховатость изделия «забрало», входящего в комплект каркаса, на его торцевой поверхности, обработанной фрезерованием и шлифованием (рисунок 15).

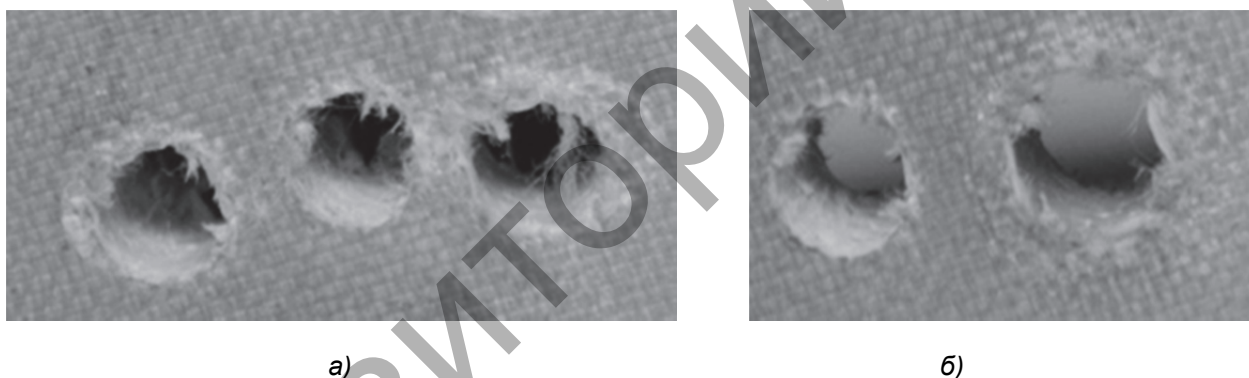


Рисунок 14. — Внешний вид просверленных отверстий с «разломачиванием» (а) и с гладкой поверхностью (б)

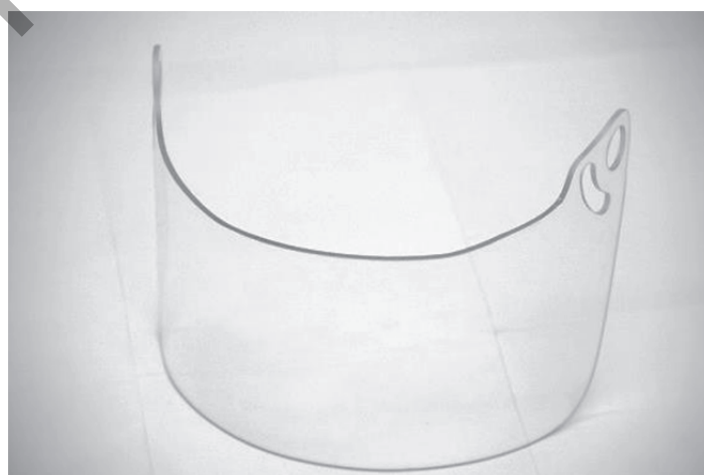


Рисунок 15. — Внешний вид изделия «забрало»

При проведении испытания были приняты параметры нормирования шероховатости поверхностей в соответствии с ГОСТ 2789-73. Учитывая, что экономически достижимая размерная точность изготовления деталей из пластмасс резанием соответствует 8-9-му квалитетам, приняты  $Ra$  3,2 мкм для IT9,  $Ra$  1,6 мкм — для IT8.

Проведенные измерения показали, что полученные значения параметров шероховатости находятся в диапазоне допустимых значений (рисунок 16).

Рекомендуется ввиду сложности контура изделия заменить требования по шероховатости на технические требования, например: острые кромки изделия притупить шлифованием.

**Рекомендации по технологическому регламенту обработки металлополимерных материалов.** На основании проведенных исследований рекомендуется вести обработку металлополимерного материала специальными сверлами из твердого сплава ВК8. Геометрия сверла: передний угол  $\gamma$  равен  $-10^\circ$ , задний угол  $\alpha$  —  $24^\circ$ , угол в плане  $\phi$  —  $62^\circ$ . Режим обработки: частота вращения  $n$  — 2 400,  $\text{мин}^{-1}$  подача  $S_0$  — 0,15 мм/об., глубина резания  $t$  — 3 мм.

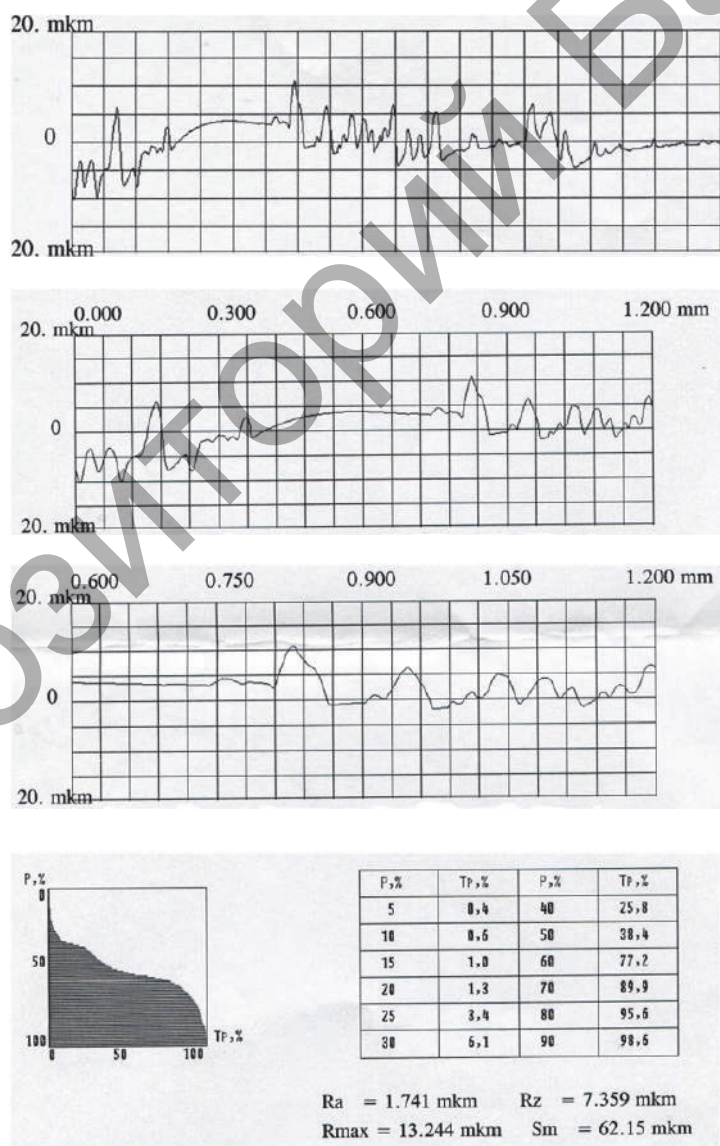
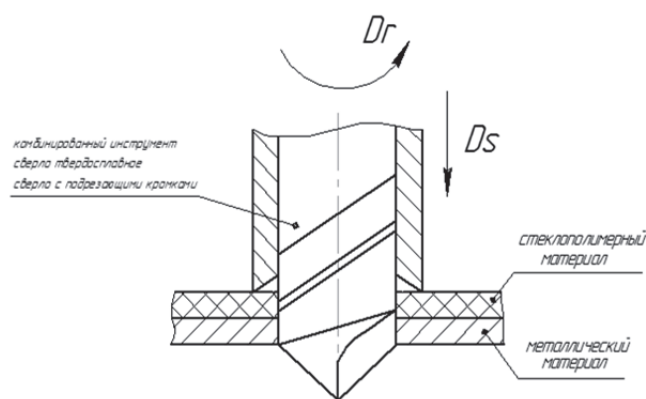


Рисунок 16. — Результаты измерения шероховатости



**Рисунок 17. — Схема резания металлостеклополимерного материала**

При обработке сверлами из быстрорежущей стали с подрезающими кромками принимаются: передний угол  $\gamma$  —  $15^\circ$ , задний угол  $\alpha$  —  $10^\circ$ , угол при вершине  $\epsilon$  —  $50^\circ$ .

При алмазном сверлении режим резания: скорость резания 60...100 м / мин, подача 0,04...0,12 мм / об., охлаждение — воздух. Для алмазного сверла размер зерен должен быть не менее 200 мкм, что обеспечивает качественную обработку в случае низкой плотности стеклопластикового материала.

Для сохранения исходных свойств обрабатываемого материала и повышения качества обработки рекомендуется схема резания (рисунок 17), при которой последовательно обрабатываются полимерный и стальной материалы твердосплавным сверлом и сверлом с подрезающими режущими кромками. При этом в процессе обработки режим резания изменяется. Целесообразно такую обработку производить на станках с ЧПУ.

**Заключение.** На основании вышеизложенного сделаны следующие выводы:

1) для обеспечения требуемого качества поверхности при сверлении металлостеклопластикового материала необходима скорость резания в пределах 50...60 м / мин и подача менее 0,15 мм / об. Определенные значения скорости резания и подачи сверла подтверждены установленными зависимостями деформации, сил и температуры резания от режимов обработки и геометрии инструмента;

2) установлено, что осевая сила и крутящий момент максимальны при прохождении сверла через металлический слой и их величины в 2...3 раза больше, чем при сверлении стеклополимерного слоя;

3) получены формулы для расчета производительности обработки с учетом количества отверстий и деталей, параметров срезаемого и снимаемого слоев, что позволяет управлять процессами формирования качества обработанных поверхностей и изнашивания режущего инструмента. Установлена прямо пропорциональная зависимость производительности обработки от частоты вращения и минутной подачи сверла;

4) в результате эксперимента определены конструктивные параметры инструмента, при которых обеспечивается рациональное качество получаемых отверстий. В частности, предложена специальная заточка трубчатого сверла с углом в плане  $\phi$ , равным  $45^\circ$ , и сегментным вырезом рабочей части в пределах 0,2...0,5 диаметра сверла (сверло-лопатка). Этому также способствует разработанная специальная технологическая оснастка для механической обработки каркасов из металлостеклополимерных материалов.

## Список цитируемых источников

1. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. / под ред. Дж. Любина, пер. с англ. А. Б. Геллера. — М. : Машиностроение, 1988. — 448 с.
2. *Рогов, В. А.* Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения / В. А. Рогов. — М. : Машиностроение, 2002. — 264 с.
3. *Баранчиков, В. И.* Обработка специальных материалов в машиностроении / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. — М. : Машиностроение, 2002. — 264 с.
4. *Степанов, А. А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А. А. Степанов. — Л. : Машиностроение, 1987. — 176 с.
5. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко [и др.] ; под общ. ред. проф. В. А. Залого. — Сумы : Унив. кн., 2013. — 272 с.
6. *Лупкин, Б. В.* Научные основы механической обработки композиционных материалов, применяемых в авиастроении : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Лупкин. — Киев, 1997. — 61 с.
7. *Лупкин, Б. В.* Сверление ПКМ свёрлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, О. М. Кошкина, А. Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — 2011. — № 49. — С. 68—79.
8. *Балыков, А. В.* Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из ХТНМ на основе алмазного сверления : дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Балыков. — М. : [б. и.], 2004. — 59 с.
9. *Попок, Н. Н.* Теория резания / Н. Н. Попок. — Новопоцк : ПГУ, 2006. — 228 с.
10. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. — М. : Машиностроение, 1967. — 416 с.
11. *Мозговой, Н. И.* Исследование процесса формирования показателей качества отверстий в деталях из стеклопластика / Н. И. Мозговой, А. М. Марков // Ползунов. вестн. — 2009. — № 1—2. — С. 284—287.

Поступила в редакцию 15.02.2017