

УДК 678.067621.892

DOI: 10.12737/article_5a70c105c37ca0.77596531

Ю.М. Зубарев, д.т.н.
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет),
А.В. Приемышев, к.т.н.,
А.С. Заостровский, аспирант
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
E-mail: priemyshev52@mail.ru

Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов

Рассмотрены различия в результатах механической обработки металлов и композитов, а также влияние технологических параметров на результаты обработки. Показаны фрактографические особенности поверхностей стружек, полученных после механической обработки заготовок из различных полимерных композитных материалов, и передних поверхностей лезвий инструментов. Полученные результаты помогут оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: стружка; полимерные композитные материалы; термореактопластичные и термопластичные материалы; хрупкое разрушение.

Yu.M. Zubarev, D. Eng.,
(Saint-Petersburg State Marine Technical University)
A.V. Priomyshev, Can. Eng.,
A.S. Zaostrovsky, Post graduate student
(Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg)

Cutting edge treatment peculiarities at cutting polymeric composite blanks

Differences in results of metal and composite machining and also the technological parameters impact upon results of machining are considered. Fracto-graphic peculiarities of chip surfaces obtained after different polymeric composite blanks machining, and front faces of cutting tool edges are shown. The results obtained will help to assess physical model potentialities at polymeric composite blank cutting.

Keywords: chips; polymeric composite materials; thermo-reactoplastic and thermo-plastic materials; brittle fracture.

Композитные материалы являются неоднородными, поэтому процессы образования стружки при механической обработке резанием заготовок из полимеров, армированных волокном, и заготовок из металлов отличаются друг от друга. Однако существуют некоторые полимерные композитные материалы (ПКМ), поведение которых при механической обработке

резанием в какой-то степени совпадает с поведением некоторых металлов. Поэтому теория резания металлов может иногда применяться для объяснения физических явлений в зоне резания ПКМ, связанных с образованием стружки.

Процесс стружкообразования при механической обработке полимеров во многом зависит

от их физико-механических свойств, материала инструмента, переднего угла инструмента, радиуса округления режущей кромки и скорости резания.

Были проведены эксперименты по изучению фрактографических особенностей поверхностей режущих пластин резцов и поверхностей стружек, полученных при обработке образцов из термореактивных полимеров. Заготовки из стеклопластика СТЭТ – пластина 800×400×25 мм. Обработка производилась на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ КАФО КА 32 с модернизацией рабочей зоны для обработки ПКМ.

Стеклопластик представляет собой слоистый композиционный материал на основе стеклотканей марок Т-10, Т-11 и эпоксидного связующего. Инструмент – двухзубая фреза диаметром 22 мм, пластина из твердого сплава Walter – ADMT 120408R-G56 (WXP 45) (тип BK8), с покрытием PVD (длина пластины, радиус при вершине), предназначена для черновой обработки. В качестве технологической жидкости (ТЖ) использовали водно-эмульсионную жидкость.

При точении заготовки диаметром 78 мм и длиной 60 мм были изготовлены из углепластика марки УГЭТ с наполнителем из углеродистой ткани марки УРАЛ, пропитанной связующим. Структура обрабатываемого изделия ПКМ – фенолформальдегидная матрица, армированная низкомолекулярным вязким углеродным волокном. Технологический процесс производства заготовки – метод намотки с последующим отверждением в гидравлическом прессе.

В качестве режущего инструмента использовался поликристаллический алмаз АСПК с геометрией: $\alpha = 0...2^\circ$, $\gamma = 20^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 20^\circ$, $r = 4$; радиус округления режущего лезвия $\rho = 3...5$ мкм, а также пластина из твердого сплава P1100-6807368 (ПКА) с державкой Walter turn и с прижимом повышенной жесткости. Сечение 25×25, радиусы при вершине 0,4 мм. Режимы обработки: частота вращения шпинделя – 4 000 об/мин, подача – 0,25 мм/об. Скорость резания при точении 280 м/мин. В качестве технологической жидкости использовали водно-эмульсионную жидкость. Эксперименты проводились на токарном обрабатывающем центре с ЧПУ мод. SL6 Milltronics (США). Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Supra 55VP (Karl Zeiss), оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа X-Max (Oxford Instruments).

Результаты электронно-микроскопических исследований поверхностей стружек позволяют

сделать ряд выводов, доказывающих, что стружка образуется путем хрупкого разрушения из-за возникновения и распространения трещин в зоне первичного сдвига после частичного образования стружки.

На фото хорошо видны поверхности хрупкого разрушения стружек без видимой пластической деформации со следами сколов, разломов (рис. 1, д, е; рис. 2, д, е, ж, з, и; рис. 3, в, г, д, е). Сегменты полностью отделены друг от друга путем хрупкого разрушения материала в зоне первичного сдвига или перед ней.

Среди стружек наблюдаются фрагменты с мелкими, средними и большими размерами с хорошо видимыми объемными элементами волокна. Подобная стружка возникает при механической обработке заготовок из углепластика УГЭТ, стеклопластика СТЭТ инструментом из твердого сплава и поликристаллического алмаза АСПК, а также таких хрупких материалов, как черные металлы, керамика и большинство композитов, армированных волокном. При обработке заготовок из этих хрупких материалов перед инструментом образуется трещина, что приводит к разрушению поверхности и ухудшению качества ее обработки [1].

Следует отметить, что при обработке заготовок из СТЭТ образуется стружка за счет частичного изгиба и растрескивания. Стекло представляет собой аморфный материал, поэтому поверхность разрушения стекловолокна является более гладкой по сравнению с другими волокнами (рис. 3).

Углеродные волокна образуют стружку за счет резкого хрупкого разрушения с очень небольшой деформацией. Поверхность разрушения зазубренная, с отдельными гранями, наклоненными к оси волокна (см. рис. 1 и 2).

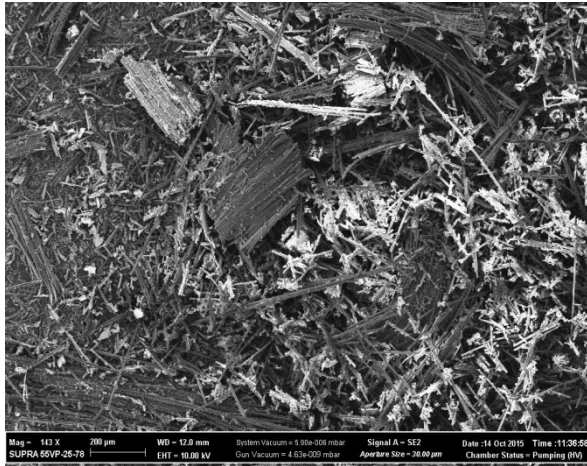
Как показали результаты экспериментов, реакция термореактопластичных и термопластичных материалов на приложенную нагрузку различается. Первые имеют очень небольшую деформацию до разрушения и поэтому ведут себя как хрупкие материалы. Вторые, как правило, пластичны, имеют достаточно большую деформацию до разрушения.

Предел прочности и относительное удлинение полимеров при разрыве также зависит от скорости приложения нагрузки. Поэтому тип образуемой стружки и качество обрабатываемой поверхности полимеров различных типов будут варьироваться в зависимости от параметров процесса резания [1].

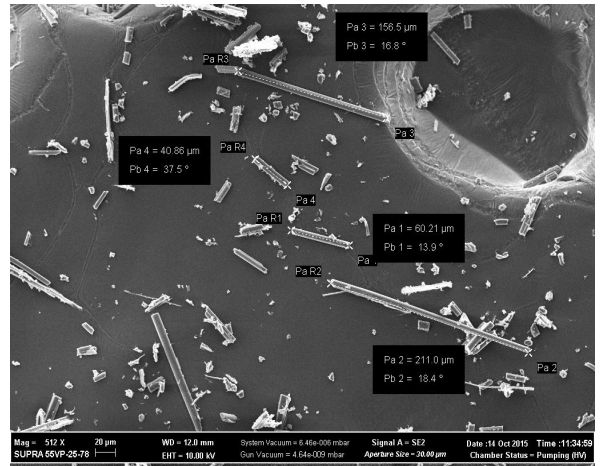
Увеличение переднего угла инструмента приводит к уменьшению степени деформации, которой подвергается материал при образова-

нии стружки. Сколы более гладкие, без резких изломов (см. рис. 2, ж, з, и). Увеличение скорости резания приводит, с одной стороны, к разрушению при более низкой деформации или по причине высокой хрупкости материала. С другой стороны, выделяемое в зоне резания тепло

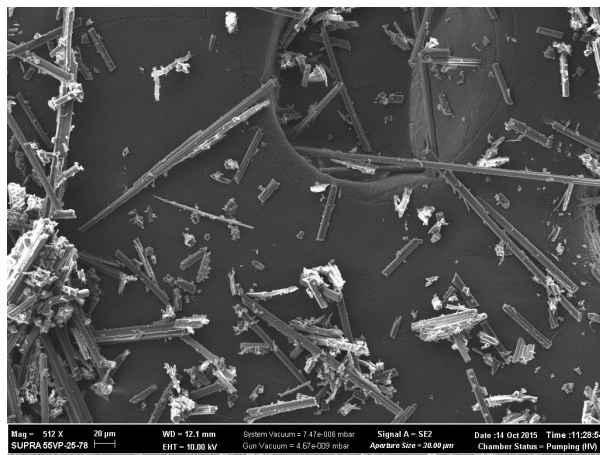
приводит к повышению температуры и, тем самым, увеличивает подвижность молекулярных цепей материала, а значит, повышает его пластичность. Какой из этих факторов будет доминирующим, зависит от молекулярной массы полимера и температуры его стеклования [2, 3].



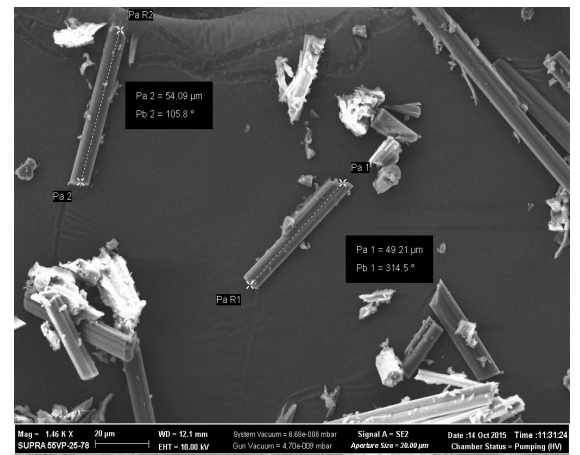
а)



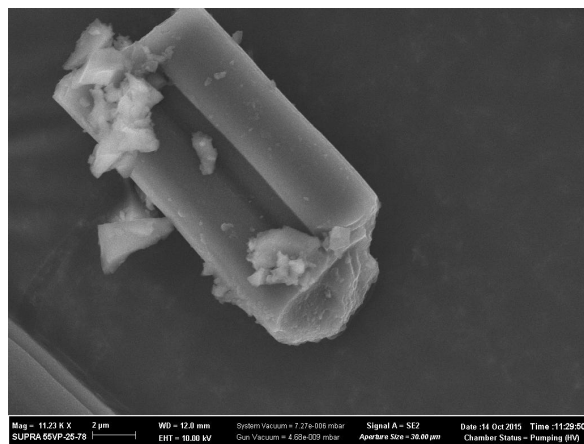
б)



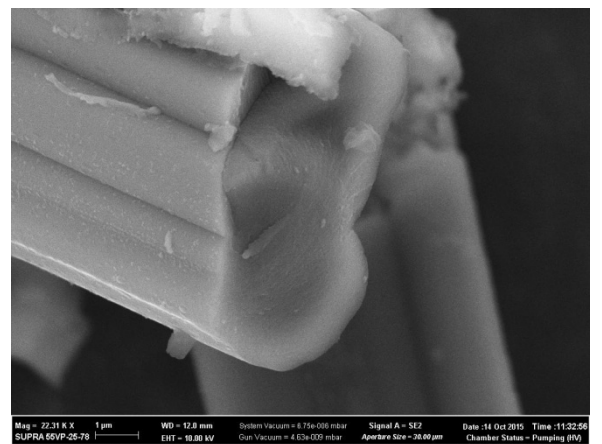
в)



з)



д)



е)

Рис. 1. Стружки, полученные при механической обработке заготовок из углепластика УГЭТ пластиной из твердого сплава P1100-6807368 (ПКА) с державкой WALTERTURN с прижимом повышенной жесткости, сечение 25×25, радиусы при вершине 0,4 мм:

а, б, в, з – стружка; д, е – поверхности разломов

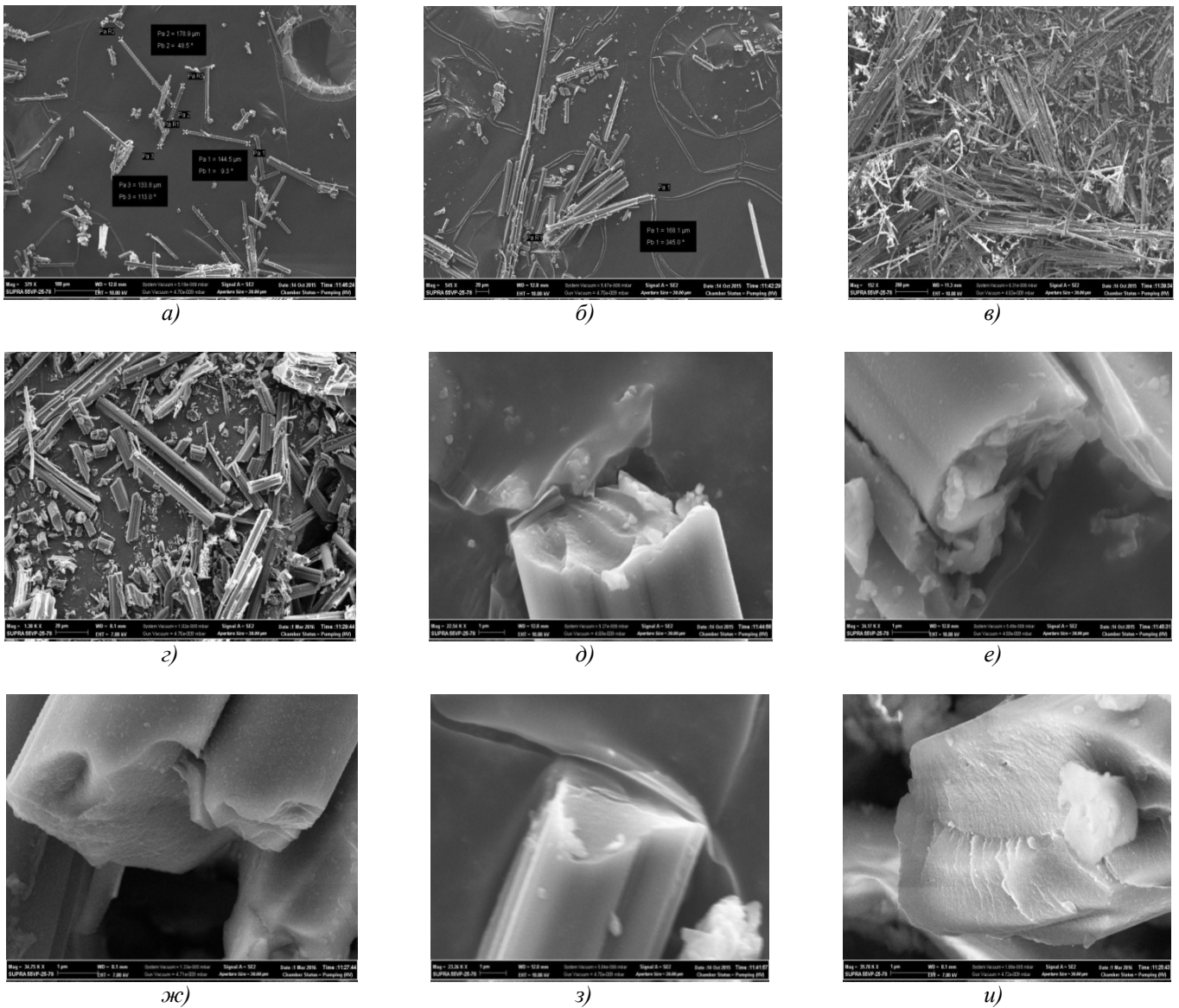


Рис. 2. Стружки, полученные при механической обработке заготовок из углепластика УГЭТ инструментом из поликристаллического алмаза АСПК с геометрией $\alpha = 0...2^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 20^\circ$, $\rho = 3...5$ мкм:
а, б, в, г – стружка; *д, е* – поверхности разломов $\gamma = 20^\circ$; *ж, з, и* – поверхности разломов $\gamma = 0^\circ$

Удельная теплоемкость полимеров, как правило, больше, чем у металлов, а их теплопроводность значительно ниже. При одинаковых уровнях теплонапряженности в зоне резания и при равных съемах материала нагрев полимеров при обработке будет больше, чем металлов. В процессе резания тепло генерируется сдвигом в зоне первичной деформации, а также за счет трения между стружкой и передней поверхностью инструмента и трения между заготовкой и задней поверхностью инструмента. Большая часть этого тепла (до 70 % при высокой скорости резания) удаляется из зоны резания вместе со стружкой [4].

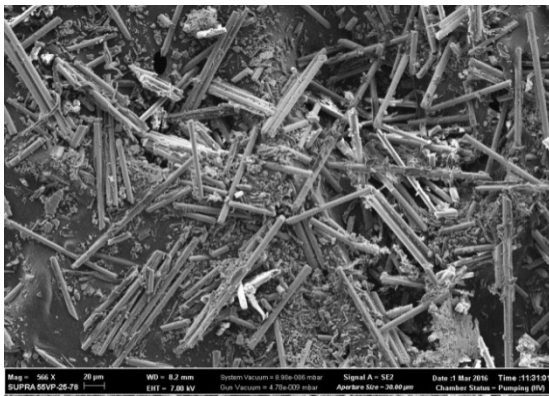
При механической обработке угле- и стеклопластиков из-за их низкой теплопроводности

тепло, выделяемое в зоне первичного сдвига, медленно передается инструменту. Тепло в тонком межфазном слое отводится за счет теплопроводности.

Как было показано в работе [3], количество тепла, отводимого стружкой из зоны первичного сдвига при более высоких скоростях резания достигает 90 %. Также, из-за низкой теплопроводности, локализованный нагрев, возникающий из-за трения между лезвием инструмента и поверхностью заготовки, может вызвать перегрев, способный привести к расплавлению обрабатываемой поверхности термореактивных полимеров и перетеканию его на переднюю поверхность инструмента. Однако, как показали результаты визуальных исследований передней

поверхности инструментов, ни на поверхности алмазов (рис. 4, а, б), ни на поверхности пластины твердого сплава (рис. 4, в, г) наличие наплавленного материала обрабатываемой заго-

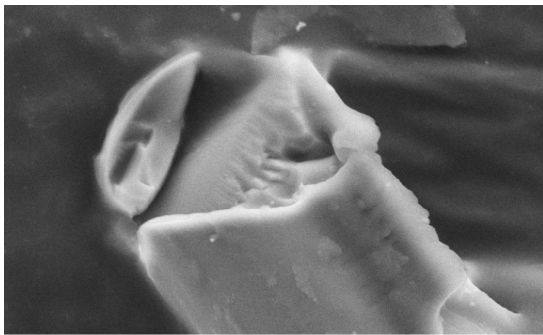
товки не было обнаружено (рис. 5, 6). На пластине из твердого сплава обнаружены следы сколов (рис. 4, в, г).



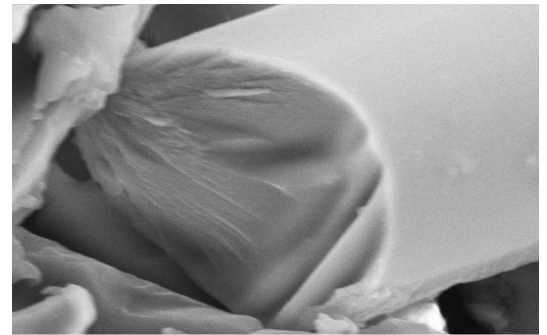
а)



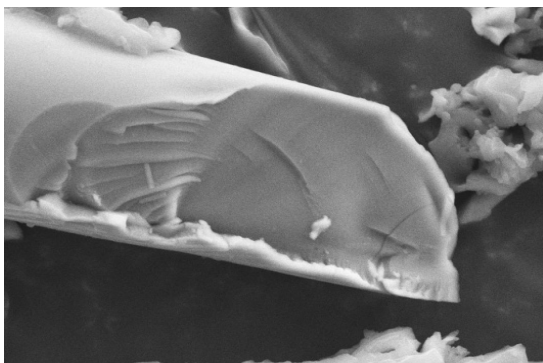
б)



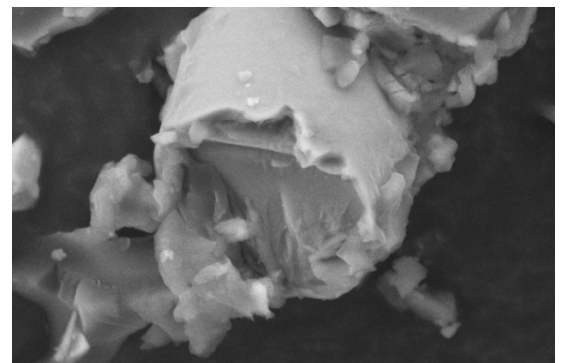
в)



г)



д)



е)

Рис. 3. Стружки, полученные при механической обработке заготовок из стеклопластика СТЭТ пластиной из твердого сплава Walter – ADMT 120408R-G56 (WXP 45) (тип BK8), с покрытием PVD:

а, б – стружка; в, г, д, е – поверхности разломов

При механической обработке полимеров возможно образование нескольких типов стружки в зависимости от типа полимера, геометрии инструмента и условий резания [5]. Непрерывная эластичная стружка образуется при небольших скоростях резания и при наличии большого положительного переднего угла ин-

струмента; при механической обработке материалов, обладающих высокой способностью к упругой деформации. Данный тип стружки практически полностью образуется за счет упругой деформации материала (для образования неэластичной стружки необходимо разделение полимерных цепей).

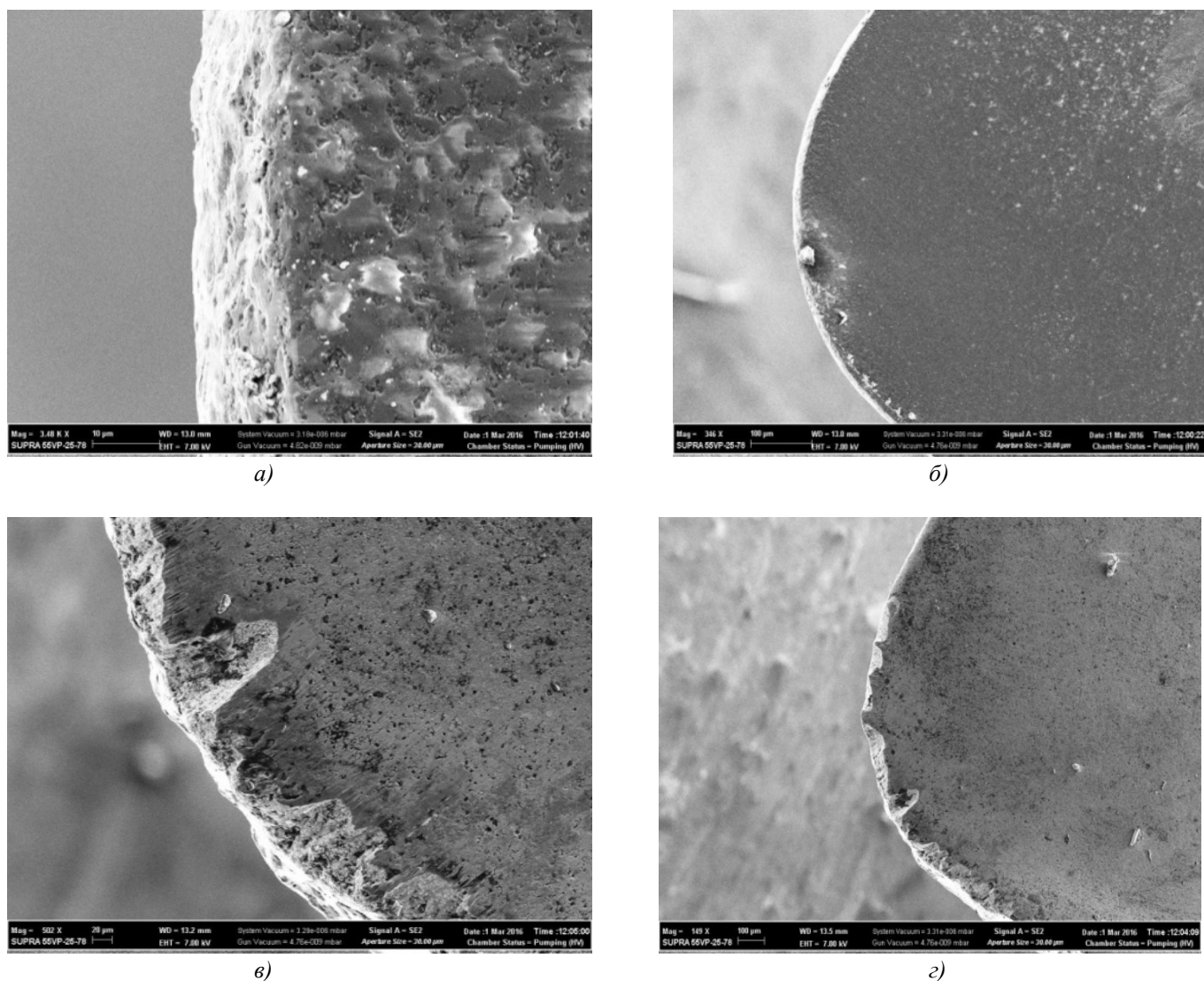


Рис. 4. Фотографии передних поверхностей инструментов из поликристаллического алмаза АСПК (*a, б*); инструмента с пластиной из твердого сплава P1100-6807368 (ПКА) с державкой Walterturn с прижимом повышенной жесткости (сечение 25×25 , радиусы при вершине 0,4 мм) (*в, з*)

Элементная стружка образуется при механической обработке таких хрупких материалов, как терморектопласты и некоторые термопласты инструментом с большим передним углом и при большой глубине резания. Перед режущей кромкой возникает трещина, стружка образуется за счет действия на материал изгибающего момента и когда трещина достигает определенной длины. Это приводит к неудовлетворительному качеству поверхности после механической обработки.

Заключение

Физические процессы, происходящие в зоне резания при механической обработке полимерных композитов, во многом аналогичны процессам при обработке однородных металлов.

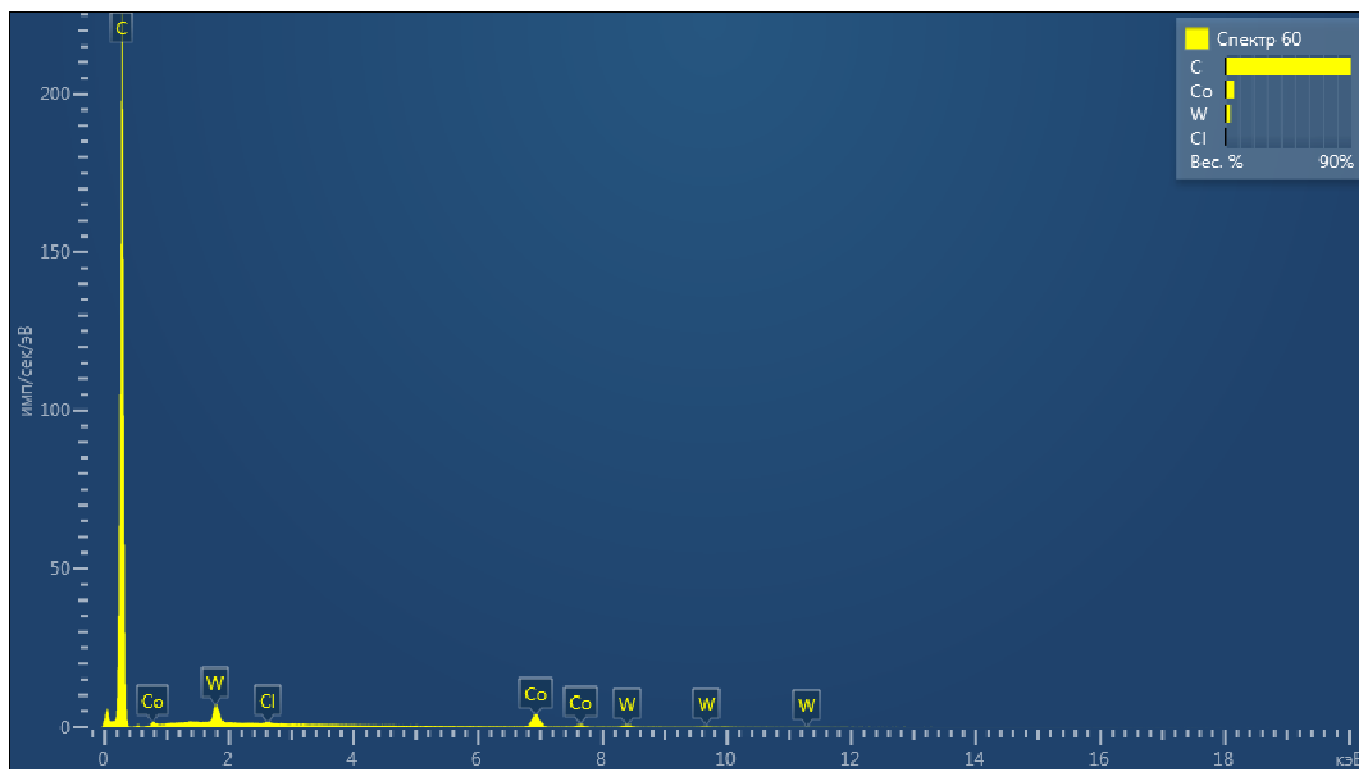
Исследования поверхностей стружек и лезвий режущих инструментов после механической обработки заготовок из жестких и прочных терморектопластов показали, что образование стружки происходит за счет хрупкого разрушения материала. Однако качество обработанной поверхности значительно выше при обработке с образованием непрерывной стружки.

В целом, характер стружкообразования при механической обработке термопластиков и терморектопластиков зависит от скорости резания и переднего угла режущего инструмента. Переход от пластичности к хрупкости происходит при увеличении скорости резания. Это связано с чувствительностью полимеров к изменению скорости.

С увеличением скорости деформации предел прочности материала возрастает, а предельное

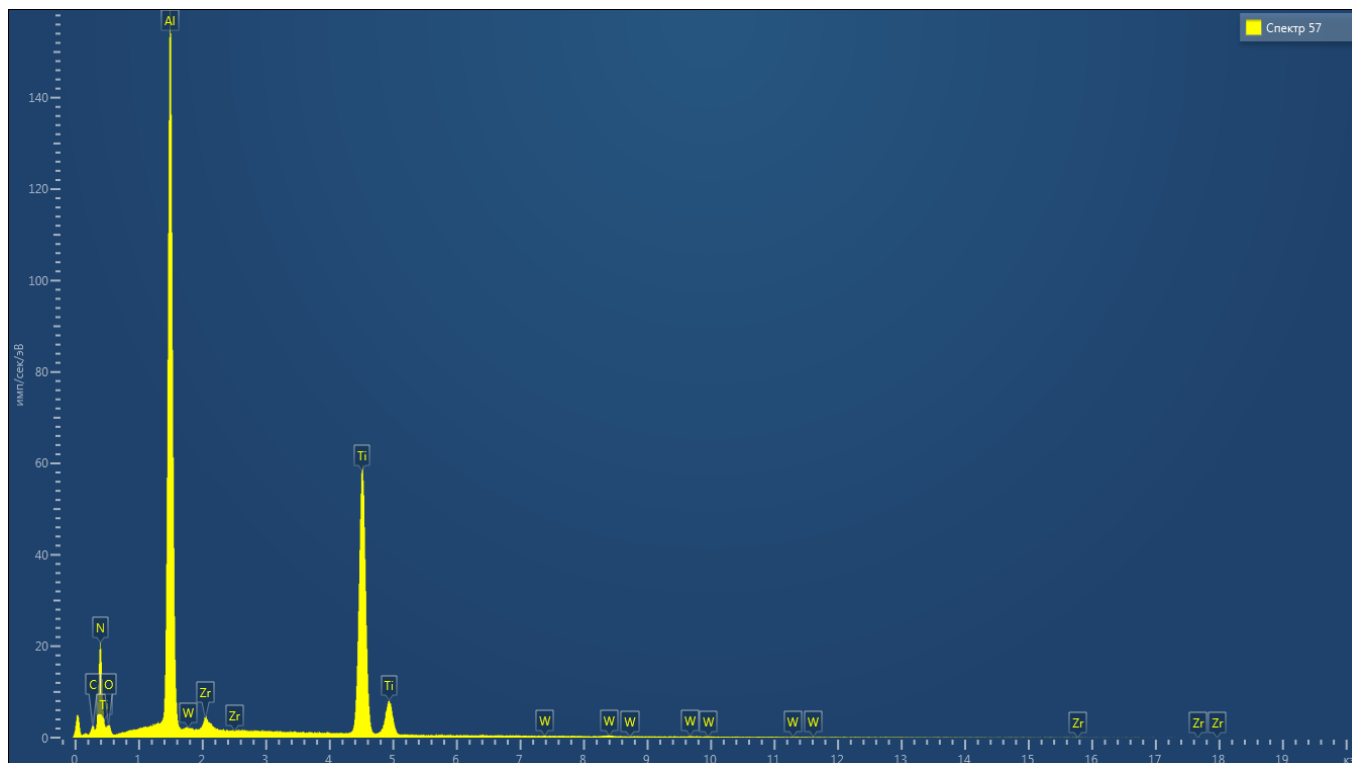
удлинение при разрыве уменьшается. Кроме того, увеличение переднего угла инструмента приводит к уменьшению пластической деформации и способствует образованию непрерывной стружки сдвигового типа. Имея низкую теплопроводность и высокую теплоемкость, полимеры способны удерживать больше тепла, возникающего при механической обработке, чем металлы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению температуры и пластичности материала.

Механическая обработка однонаправленных волокнистых полимеров в значительной степени зависит от ориентации волокон и в меньшей степени – от переднего угла режущего инструмента. Тип стружкообразования для конкретной ориентации волокон определяет получаемое качество поверхности и динамические характеристики сил резания. Образование непрерывной стружки, как правило, не встречается при обработке однонаправленных волокнистых полимеров.



Элемент	Тип линии	Условная концентрация	Отношение k	Вес, %	Сигма Вес, %	Название эталона	Предустановленный эталон	Дата калибровки эталона
C				89,56				
Cl	К серия	0,14	0,00119	0,15	0,02	NaCl	Да	
Co	К серия	4,88	0,04884	6,35	0,09	Co	Да	
W	М серия	3,22	0,03219	3,95	0,08	W	Да	
Сумма:				100,00				

Рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа на приставке к сканирующему электронному микроскопу X-Max передней поверхности инструмента из поликристаллического алмаза АСПК. Диаметр первичного электронного пучка – 0,1...0,5 мкм, ускоряющее напряжение 20 кВ, площадь кристалла 80 мм², разрешение 124 эВ. По оси ординат – интенсивность (весовой % элемента), по оси абсцисс – энергия квантов рентгеновского излучения при экспонировании электронных пучков



Элемент	Тип линии	Условная концентрация	Отношение k	Вес, %	Сигма Вес, %	Название эталона	Предустановленный эталон	Дата калибровки эталона
N	К серия	44,52	0,07927	25,36	0,40	BN	Да	
O	К серия	1,56	0,00527	5,01	0,31	SiO2	Да	
Al	К серия	35,92	0,25802	33,83	0,24	Al2O3	Да	
Ti	К серия	33,58	0,33582	33,67	0,24	Ti	Да	
Zr	L серия	1,40	0,01405	1,87	0,11	Zr	Да	
W	M серия	0,17	0,00169	0,26	0,11	W	Да	
Сумма:				100,0				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С.** Полимерные материалы в машиностроении и технологии их обработки. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 172 с.
2. **Xiao K.Q., Zhang L.C.** The role of viscous deformation in the machining of polymers // *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 2317–2336, 2002, pp. 123–131.
3. **Gubbels G.P.H.** Diamond Turning of Glassy Polymers, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006, pp. 35–39.
4. **Shaw M.C.** Metal Cutting Principles, 2nd Edition, Oxford University Press, New York, NY, 2005, p. 234.
5. **Приемышев, А.В., Заостровский, А.С.** Особенности

механической обработки высокотехнологичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна с термопластичной матрицей // *Наука и образование: инновации, интеграция и развитие*. 2014. №1. – С. 174–179.

REFERENCES

1. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. *Polymeric Materials in Mechanical Engineering and Technologies for Their Machining*. – S-Pb.: Polytechnics Publishers, 2017. – pp. 172.
2. Xiao K.Q., Zhang L.C. The role of viscous deformation in the machining of polymers // *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 2317–2336, 2002, pp. 123–131.

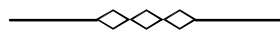
3. Gubbels G.P.H. Diamond Turning of Glassy Polymers, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006, pp. 35–39.

4. Shaw M.C. Metal Cutting Principles, 2nd Edition, Oxford University Press, New York, NY, 2005, p. 234.

5. Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Machining pecu-

liarities of high-technology polymeric composite materials based on carbon fiber with thermoplastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. 2014. – No.1. – pp. 174-179.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандошко



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЖУРНАЛА

«Научно-технические технологии в машиностроении»

объявляет подписку на 2018 год

Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 79195,

Журнал выходит с 2011 г.

«Пресса России» – 39536.

Почтовый адрес издательства:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7,

Редакция издания приглашает авторов публикаций к совместной работе.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 10.12.2017. Выход в свет 31.01.2018.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

