



УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article_5c7434f17ef7f9.84873144

Ю.М. Зубарев, д.т.н.

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3)

А.В. Приемышев, к.т.н.

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemyshev52@mail.ru

Обработка полимерных композиционных материалов лезвийным инструментом

Приведены результаты исследований по влиянию времени обработки и пути резания на износ режущего инструмента из различных инструментальных материалов при обработке заготовок из полимерных композиционных материалов. Даны рекомендации по геометрии режущей части инструмента и наиболее эффективным инструментальным материалам.

Ключевые слова: композиционные материалы; лезвийная обработка; инструментальный материал; стружкообразование; режимы резания; износ по задней поверхности; силы резания.

Yu.M. Zubarev, Dr. Sc. Tech.

(Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya Str, Saint-Petersburg)

A.V. Priyomyshev, Can. Sc. Tech.

(Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg,
29, Polytechnicheskaya Str, Saint-Petersburg)

Polymeric composite processing with blade tool

Investigation results on the impact of processing time and a cutting way upon wear a cutter made of different tool materials at the machining of polymeric composite blanks are shown. There are given recommendations on cutter plate geometry of a tool and the most efficient tool materials.

Keywords: composites; blade treatment; tool material; chip formation; cutting modes; wear on clearance face; cutting forces.

Одним из перспективных направлений развития кораблестроения XXI в. является освоение различных полимерных композиционных материалов (ПКМ) для изготовления как отдельных деталей узлов и механизмов, так и корпусов различных судов.

В настоящее время в судостроении и кораблестроении всё большее применение находят такие ПКМ, как стеклопластики, углепластики и др. Каждый из этих материалов занимает сегодня свою нишу применения в судостроении, однако, следует отметить, что эти ниши постоянно развиваются и увеличиваются.

ПКМ обеспечивают в силовых конструкциях высокую эксплуатационную надежность и долговечность, что весьма актуально как в судостроении и авиации, так и в строительной индустрии (мостовые сооружения), энергетике и др. Высокотехнологичные ПКМ всё больше начинают замещать металл в различных областях промышленности. По использованию и

применению ПКМ, в настоящее время, судостроение занимает одно из ведущих мест.

Композиционный материал – это конструкционный материал (пластик) армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе.

Используемая матрица в ПКМ обеспечивает связь армирующего материала, а также передачу и распределение напряжения в его объеме. Армирующие наполнители (тонкие непрерывные волокна, нити, ткани, жгуты) несут на себе основные нагрузки, обеспечивают физико-механические характеристики материала: высокую прочность и жесткость в направлении ориентации волокон. Так, например, углепластики в шесть раз прочнее титана, при этом, в пять раз легче высокопрочной стали и в 1,5...2,0 раза легче алюминия. При этом они практически не подвержены коррозии.

Сегодня углепластики уже широко применяются не только для изготовления корпусов кораблей и обшивки самолетов-невидимок, но тормозных дисков, подшипников скольжения, деталей двигателей и турбин, различных корабельных надстроек, что позволяет значительно облегчить конструкцию, повысить теплоизоляцию наружных стенок и т.п.

Как показывает практика, большинство деталей из ПКМ, полученных прессованием, не соответствует классу точности достаточному для машиностроения и судостроения. Необходимы отделочные операции в виде их лезвийной механической обработки.

Обрабатываемость большинства ПКМ, значительно отличается от обработки металлов и вызывает определенные трудности. Теплопроводность ПКМ значительно ниже теплопроводности металлов. Поэтому, теплота, которая выделяется в процессе резания, концентрируется главным образом в инструменте, что отрицательно сказывается на его работоспособности (стойкости). Малая температура размягчения пластмасс (основы ПКМ) в условиях резания (температура в зоне обработки достигает 150 °С) часто является причиной образования задиров («разломачивания») на обработанной поверхности изделия.

В связи с изложенным можно сделать вывод, что для эффективности механической обработки ПКМ необходимо определить наиболее эффективный инструментальный материал, геометрию режущего инструмента и режимы резания.

Рассматривая механические свойства пластмасс, как конструкционный материал, мож-

но условно подразделить их на три группы:

- пластмассы малой прочности (фенопласты, фенолиты, амилолиты и др.), имеющие предел прочности около 50 МПа;

- пластмассы средней прочности: слоистые пластики, изготовленные из бумаг (гетинакс), хлопчатобумажной ткани (текстолит) и древесно-слоистые пластики (ДСП). ДСП и текстолит по прочности близки к литым алюминиевым сплавам, а удельная прочность их выше;

- высокопрочные пластики, например ПКМ, состоящие из полимера, армированного стекло-волокном, углеволокном, углетканью, арамидом пр. Наиболее распространенными полимерам в этой группе являются фенолоформальдегидные, эпоксидные и полиэфирные смолы.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. На основе графитосодержащих материалов созданы различные по составу и свойствам ПКМ, которые получили название углепластики. Свойства некоторых, наиболее часто применяемых углепластиков приведены в табл. 1.

Механическая обработка пластмасс, в частности получение высокой точности и требуемого качества поверхности (малой высоты шероховатости), затрудняется вследствие неоднородности материала, неодинаковой твердости их основных частей (смолы и наполнителя). При работе резцами с относительно большим радиусом округления режущей кромки, что имеет место при резании ПКМ твердых сплавов и, особенно, твердых сплавов с покрытиями, таких как TiN и др., а так же с алмазоподобными покрытиями, точность и качество обработки не всегда отвечают заданным требованиям, вследствие упругой деформации ПКМ и явления «разломачивания» на обработанной поверхности, а также значительным износом по задней поверхности режущего инструмента.

Процесс структурообразования при обработке ПКМ наиболее зависит от ориентации волокна и значения переднего угла резания, а также материала волокна и материала матрицы. Угол ориентации волокна определяется по направлению движения часовой стрелки с учетом направления резания.

Износ резцов из различных инструментальных материалов при токарной обработке ПКМ приведен в табл. 2.

Как показали выполненные исследования,

основными механизмами износа при лезвийной обработке ПКМ являются абразивное истирание и выкрашивание режущей кромки. При обработке углепластиков со скоростью резания до 200 м/мин зафиксирована температура 200...280 °С, а при обработке стеклопла-

стиков с той же скоростью резания зафиксирована температура до 400 °С. Это позволяет исключить возможность доминирования химического износа, хотя полностью его исключить нельзя.

1. Сравнительные характеристики полимерных антифрикционных материалов

Свойства	Полимерные композиционные материалы								Резины марка 8075
	Бакаут	Термопласты			Терморектопласты				
		Ф4К20	Капролон Б	Тордон XL	Текстолит	Оркот	УГЭТ	ФУТ	
Плотность, кг/м ³	1200	2100	1150	1200	1300	1300	1450	1450	1300
Прочность при растяжении, МПа	70	12,5	80	35	90	55	280	200	9
Модуль нормальной упругости, ГПа	-	0,85	2	0,5	5	7	15	15	0,006
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°С·10 ⁶	-	50	98	100	30	6	16	16	70
Объемное изменение размеров при работе в воде, %	4	0	5	1,3	10	5,4	0	0	2,0
Диапазон рабочих температур, °С	-60 +120	-200 +250	-40 +70	-60 +107	-30 +110	-30 +120	-200 +120	-200 +140	-10 +45
Максимальное допустимое контактное давление, МПа (по экспресс-методике)	20	12	25	15	25	30	60	50	7
Коэффициент трения	0,05	0,005... 0,1	0,03...0, 1	0,03...0, 1	0,03...0,1	0,03... 0,1	0,07...0, 1	0,02... 0,05	0,03...0, 1
Линейная интенсивность изнашивания (·10 ⁻⁹)	11	70	10	30	50	10	0,3	0,5	30

2. Износ резцов h₃, мм, из различных инструментальных материалов при токарной обработке ПКМ

Материал режущей части резцов	Путь резания, L м					
	200	400	600	800	1200	1400
АСПК	0,05	0,06	0,07	0,09	0,1	0,15
КНБ	0,1	0,12	0,15	0,25	0,4	0,5
Al ₂ O ₃ +ZiO ₂	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
Al ₂ O ₃ +TiC	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	-
P20 с покрытием	0,2	0,8	1,0	1,5	-	-
K10 с покрытием	0,25	0,6	1,0	1,5	-	-
K10	0,3	0,6	1,2	1,6	-	-

Влияние времени обработки и скорости резания на износ режущего инструмента, оснащенного различными инструментальными материалами, приведены в табл. 3 и 4, а в зависимости от пути резания – в табл. 5.

Наиболее рациональной скоростью резания при обработке ПКМ инструментом из твёрдо-

го сплава с алмазоподобным покрытием является скорость v = 100...120 м/мин. При увеличении скорости свыше 150 м/мин возрастают составляющие силы резания и температура в зоне обработки, что приводит к интенсивному отслаиванию алмазоподобного покрытия и резкому увеличению износа инструмента.

3. Влияние времени обработки на износ инструмента по задней поверхности h_3 , мм, для различных инструментальных материалов

Инструментальный материал	Время обработки, мин						
	20	40	60	80	100	120	140
АСПК	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,16
КНБ	0,1	0,15	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7
Al ₂ O ₃ +ZiO ₂	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9
P20 с покрытием	0,4	0,7	1,0	1,4	-	-	-
K10 с покрытием	0,3	0,6	1,2	1,5	-	-	-

4. Износ резцов h_3 , мм, оснащенных твердым сплавом группы ТТК с алмазоподобным покрытием в зависимости от скорости резания при обработке ПКМ

Скорость резания м/мин	Время обработки, мин					
	2	4	6	8	10	12
114	0,08	0,18	0,19	0,24	0,28	0,3
182	0,2	0,4	-	-	-	-
228	0,4	0,8	-	-	-	-

5. Износ резцов h_3 , мм, из различных инструментальных материалов при токарной обработке углепластика УГЭТ

Инструментальный материал	Путь резания, L м						
	200	400	600	800	1000	1200	1400
АСПК	0,04	0,06	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
КНБ	0,04	0,08	0,12	0,14	0,16	0,18	0,18
Керамика	0,18	0,22	0,24	0,28	0,42	0,44	0,5
ТК+TiN	0,1	0,3	0,42	0,61	-	-	-
ВК+TiN	0,1	0,38	0,7	-	-	-	-
ВК+алмазоподобным покрытием	0,08	0,1	0,22	0,24	0,3	0,38	-

Как известно, срок службы инструмента (по Тейлору) зависит от скорости резания:

$$v \cdot T^n = C,$$

где v – скорость резания, м/мин; T – срок

службы инструмента, мин; n и C – эмпирические константы.

Значения эмпирических констант n и C для различных пар инструмент – заготовка при токарной обработке приведены в табл. 6.

6. Коэффициенты в уравнении Тейлора для срока службы режущего инструмента

Заготовка	Инструмент	d , мм	n	C	Скорость резания (м/мин)
Однонаправленный стеклопластик	K10	2,0	0,2334	90	30...50
Однонаправленный стеклопластик	ПКА	2,0	0,1684	398	200...250
Углепластик, полученный методом филаментной намотки	K10	2,0	0,7813	1640	80...300
Углепластик, полученный методом филаментной намотки	ПКА*	2,0	0,4237	2900	500...1500
Стеклопластик	K10**	1,0	0,4069	565,6	100...300
Стеклопластик	K10	1,0	0,2710	152,66	100...300

Примечания: * – VB = 0,1 мм; ** – с алмазоподобным покрытием. Подача – 0,1 мм/об; $h_3=0,2$ мм.

Рекомендуемые геометрические параметры режущей части резцов, применяемых для обработки углепластиков, приведены в табл. 7.

7. Геометрические параметры режущей части резцов, применяемых для обработки углепластиков

Обрабатываемый материал	Материал режущей части инструмента	Геометрические параметры резцов						
		α	γ	ϕ	ϕ_1	λ	r	l_ϕ
		градус					мкм	мм
Углепластик УГЭТ, ФУТ	ВК6	25...30	15	45	15...45	0	10	–
	ВК6М							
	ВК6ОМ							
	ВК8							
	ВК8+TiN							
	TK+CA							
	АСПК	0...2	20	45	20	0	3...7	0,2...0,6
	КНБ	5...8	10...15	45	15...20	0	3...5	0,1...0,3
	Керамика	0...2	10	45	15...20	0	5...8	0,2...0,4
У12А+TiC	0...2	10	45	15...20	0	8...10	0,1...0,4	

Как показали результаты выполненных исследований, наиболее эффективными при обработке ПКМ являются инструменты, оснащенные АСПК (алмаз синтетический) и КНБ (кубический нитрид бора).

Допустимые величины износа резцов из АСПК и КНБ при обработке углепластиков, при начальном радиусе округления режущей кромки $\rho = 2...3$ мкм, составляют:

для АСПК:

– черновая обработка $h_3 = 0,1...0,2$ мм;
 $Rz = 40...10$ мкм;

– чистовая обработка $h_3 = 0,08...0,1$ мм;
 $Ra = 0,8...1,4$ мкм.

для КНБ (эльбор-Р и эльбор-РМ):

– черновая обработка $h_3 = 0,15...0,3$ мм;
 $Rz = 10...40$ мкм;

– чистовая обработка $h_3 = 0,06...0,1$ мм;
 $Ra = 0,8...1,2$ мкм.

Выводы

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. При предварительной обработке ПКМ можно использовать инструменты из твердого сплава с покрытиями типа TiN и другими, хотя эффективность обработки и не является оптимальной.

2. Применение твердосплавного инструмента с алмазоподобным покрытием ещё менее эффективно, вследствие его высокой стоимости и недостаточной стойкости из-за отслаивания покрытия.

3. Наиболее эффективным является использование режущего инструмента, оснащенного алмазом (АСПК) или кубическим нитридом бора (КНБ) как на черновых, так и на чистовых операциях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубарев Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5(71). – С. 30-33.

2. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №8(74). – С. 36-46.

3. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. – Сумы: Изд-во ИТД «Университетская книга», 2013. – 97 с.

REFERENCES

1. Zubarev Yu.M., Priyomyshev A.V., Zaostrovsky, A.S. Technology peculiarities in carbon plastic machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No. 5(71). – pp. 30-33.

2. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V. Innovation technologies of polymeric composites in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 8(74). – pp. 36-46.

3. *Composite Machining at Aircraft Assembly*. – Sumy: ITD “University Book” Publishing House, 2013. – pp. 97.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров