

УДК 669.02/09:519.28

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ  
ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*д-р техн. наук, проф. Н.В. СПИРИДОНОВ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск);  
*канд. техн. наук, доц. А.Г. ЯСЕВ*  
(Национальная металлургическая академия Украины, Киев)

*Представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств пластин, которые являются частями теплозащитных покрытий машин, из композиционного материала на полимерной основе; установлены закономерности их поведения при характерных статических и динамических видах нагружения. На основании результатов экспериментов предложено процесс механического разделения композитов представить в виде двух последовательно выполняемых этапов, а именно ослабление и отделение элемента. Соответственно математическая модель содержит два уровня. Первый уровень охватывает описание двухстороннего локального деформирования пластины из композиционного материала системой конусов с определенными углом и порядком (шагом) расположения. Второй уровень включает описание среза отделяемого элемента по ослабленному контуру сечения пластины при ударном приложении нагрузки. На основании результатов моделирования предложена оснастка для дробления пластин из композиционных материалов с использованием двухстадийной схемы работы.*

При создании современных машин широко применяются [1, 2] композиционные конструкционные материалы, обеспечивающие возможность получения необходимого сочетания свойств деталей. Например, важной областью применения жаропрочных композиционных материалов является их использование для тепловой защиты машин металлургического производства. При этом технологические и физико-механические свойства композиционных материалов, применяемых для конкретных деталей, требуют дополнительных исследований [3 – 5]. Большое экологическое значение имеет создание технологической оснастки для утилизации деталей из композиционных материалов после истечения срока их службы. Одним из этапов утилизации деталей в форме пластин (плоских или с большим радиусом кривизны) является их разделение на элементы заданного размера. Для технологического оснащения такого процесса следует применить систему математического моделирования [6], которая включает:

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

**Математическое моделирование**

Цель – создать математические модели, учитывающие основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на результаты использования оснастки для разделения пластин из композиционного материала. Погрешность моделирования не более 15 %. Стоимость моделирования не должна превышать 5 % стоимости продукции, для утилизации которой используется оснастка.

Предварительно проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств пластин (которые являются частями теплозащитных покрытий машин) из композиционного материала на полимерной основе (СТЭФ) и установлены закономерности их поведения при характерных статических и динамических видах нагружения [4]. На основании результатов экспериментов предложено процесс механического разделения композитов представить в виде двух последовательно выполняемых этапов, а именно ослабление и отделение элемента. Соответственно математическая модель содержит два уровня. Первый уровень охватывает описание двухстороннего локального деформирования пластины из композиционного материала системой конусов с определенными углом и порядком (шагом) расположения. Второй уровень включает описание среза отделяемого элемента по ослабленному контуру сечения пластины при ударном приложении нагрузки.

Опишем локальное деформирование композита при внедрении одного конуса с помощью модели Фогта [1, 2], содержащей соединенные параллельно упругий и вязкий элементы. Уравнение движения, соответствующее этой модели, имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + F(x, s, \alpha) = P(t), \quad (1)$$

где  $x$  – перемещение;  $m$  – приведенная масса деформируемой системы;  $\eta$  – коэффициент вязкого трения;  $F(x, s, \alpha)$  – восстанавливающая сила;  $P(t)$  – импульсная периодическая нагрузка.

После преобразования выражений для восстанавливающей силы и импульсной нагрузки уравнение примет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + kx = g(t)s \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\bar{k} g_0 s b^2 \cos \frac{\alpha}{2}}{D}, \quad (2)$$

где  $k$  – жесткость деформируемой системы;  $\bar{k}$  – коэффициент сопротивления внедрению конуса;  $g(t)$  – распределенная импульсная нагрузка;  $s$  – площадь, по которой распределена импульсная нагрузка  $g(t)$ ;  $\alpha$  – угол конуса;  $g_0$  – амплитудное значение импульсной распределенной нагрузки  $g(t)$ ;  $b$  – минимальный размер пластин композита;  $D$  – изгибная жесткость.

Решение уравнения (2) при разложении правой части в ряд Фурье на интервале  $T/2 < t < T/2$  имеет вид:

$$x(t) = \frac{1}{kT} t_n g_0 s \cos \frac{\alpha}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2g_0 s \cos \frac{\alpha}{2}}{i\pi} \left(1 - \frac{\bar{k} b^2}{D}\right) \cdot \sin \frac{i\pi t_n}{T} \left[ B \cos \frac{2i\pi t_n}{T} + C \sin \frac{2i\pi t_n}{T} \right]. \quad (3)$$

Описание процесса ударного отделения ослабленного элемента пластины можно осуществить с помощью выражения:

$$P \cdot t_n = m_0 \cdot v_0, \quad (4)$$

где  $t_n$  – время действия ударной нагрузки;  $m_0$  – масса детали, производящей удар;  $v_0$  – скорость детали, производящей удар.

Пусть деталь, производящая удар, совершает вращательное движение (рис. 1), тогда линейная скорость

$$v_0 = \omega_0 \cdot R_0, \quad (5)$$

где  $\omega_0$  – угловая скорость вращения;  $R_0$  – приведенный радиус детали.

Угловая скорость детали (далее – долбяка) определяется величиной необходимой производительности процесса дробления  $\dot{M}$  (кг/с), а также дополнительным условием, состоящим в том, что за один оборот долбяка пластина должна переместиться на расстояние, равное требуемому размеру  $S$  отделяемого элемента:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \dot{M}}{\rho_{пл} \cdot t_{пл} \cdot S \cdot S_1}, \quad (6)$$

где  $\rho_{пл}$  – плотность композиционного материала;  $t_{пл}$  и  $S_1$  – толщина пластины и ее ширина.

Численные значения параметров математической модели определены для случая разделения пластин (толщиной 30 мм) композиционного материала СТЭФ с известными физико-механическими свойствами. Дополнительно определены величины радиуса цилиндрической части, массы, линейной и угловой скорости долбяка, время действия ударной нагрузки и другие параметры.

Проверка СММО выполнена для обеих уровней (блоков) по критерию оценки СММО для малых выборок [7] (табл. 1 и 2). Значения выходных переменных для обеих моделей находятся между предельными значениями критерия, что подтверждает наличие СММО.

Таблица 1

Численные значения параметров математической модели

Варианты экспериментов	Выходная переменная модели	$\xi_{max}$	$\xi_{min}$
1	0,0211	0,022924	0,017276
2	0,0193	0,021124	0,015476
3	0,0272	0,029024	0,023376
4	0,0184	0,020224	0,014576
5	0,0314	0,033224	0,027576
6	0,0161	0,017924	0,012276

Математическое моделирование [8] позволяет определить основные направления и принципиальные решения при создании технологической оснастки.

Таблица 2

Численные значения параметров математической модели

Варианты экспериментов	Выходная переменная модели	$\zeta_{max}$	$\zeta_{min}$
1	1504	1545,18	1502,72
2	1316	1357,20	1314,62
3	1517	1558,17	1515,81
4	1264	1305,21	1262,79
5	1529	1570,18	1527,82
6	1106	1147,19	1104,80

**Разработка конструктивно-технологических предложений**

На основании результатов моделирования предложена оснастка для дробления пластин из композиционных материалов с использованием двухстадийной схемы работы [9] (рис. 1).

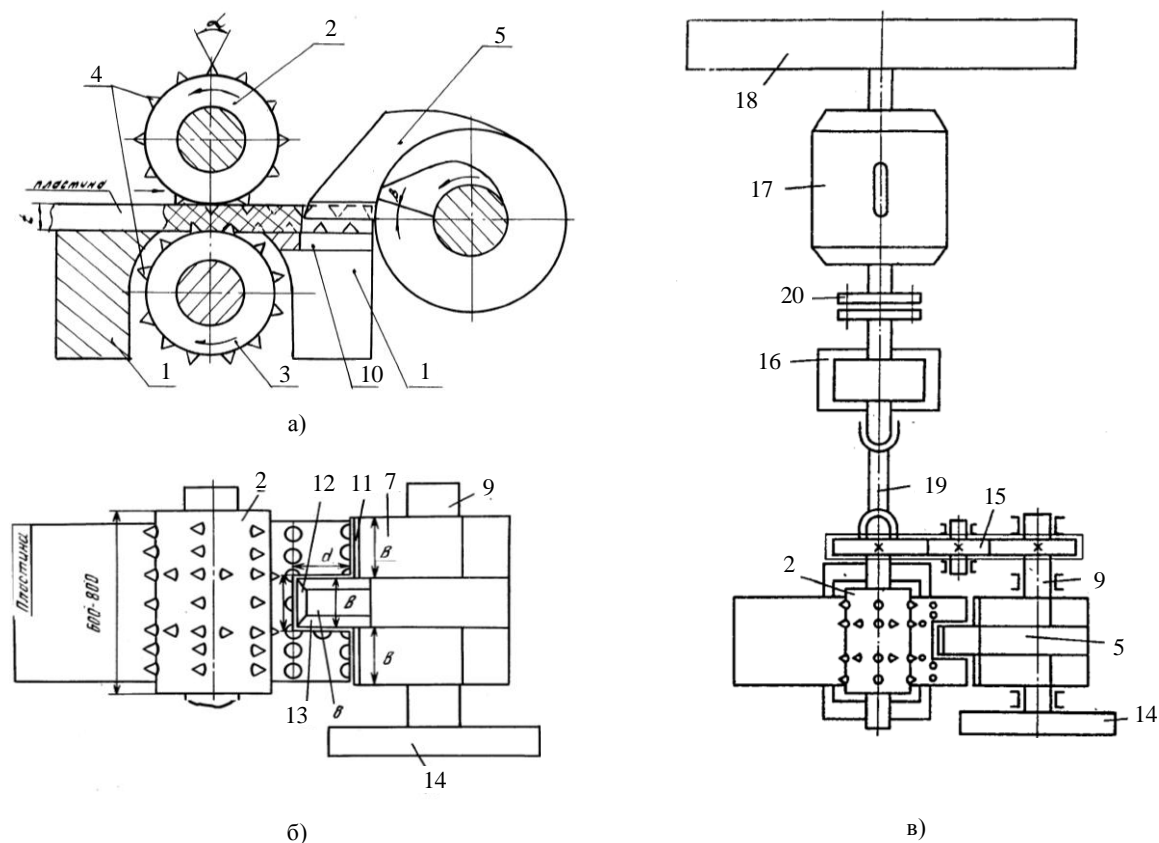


Рис. 1. Конструктивная схема устройства для дробления пластин из композиционного материала:

(а – вид сбоку; б – вид сверху; в – связь устройства с приводом)

1 – рама; 2 – верхний валок; 3 – нижний валок; 4 – шипы; 5 – подвижный нож; 6 – неподвижный нож;  
 7 – отрезные зубья; 8 – прорезные зубья; 9 – вал; 10 – вырезы неподвижного ножа;

11 – режущая кромка отрезного зуба; 12, 13 – режущие кромки прорезного зуба; 14, 18 – маховики;  
 15 – зубчатая передача; 16 – редуктор; 17 – электродвигатель; 19 – кардан; 20 – муфта

На первой стадии производится направленное ослабление отделяемых элементов по их контуру путем вдавливания конусов (шипов) 4, установленных на валках, через которые «прокатываются» пластины. Верхний 2 и нижний 3 валки приводятся в движение от привода через кинематическую передачу 15. При вращении валков происходит двухстороннее вдавливание шипов 4, в результате чего образуется «насечка» требуемого размера, определяющая контуры разделения за счет частичной перфорации пластины. Шипы 4 в поперечных и продольных рядах расположены относительно друг друга в шахматном

порядке (со смещением на величину  $0,5S$ ). Под воздействием вдавливающей силы композиционный материал пластины расслаивается и достигается значительное ослабление перемычек разделяемых элементов.

На второй стадии производится отделение ослабленных элементов путем нанесения по ним ударов в зоне действия подвижного 5 и неподвижного 6 ножей. Отрезной 7 и прорезной 8 зубья имеют в плане прямоугольную форму, а их размеры соответствуют размерам отделяемого элемента. Прорезной зуб 8 расположен (на угол  $\beta = 10 \dots 15^\circ$ ) перед отрезным зубом 7. Прорезные зубья 8 разрушают продольные и поперечные перемычки и отделяют элементы материала. Отрезные зубья 7 разрушают оставшиеся поперечные перемычки и отделяют остальные элементы. Режущие кромки 11, 12, 13 зубьев 7 и 8 в дополнение к ударному воздействию осуществляют резание по контуру, ослабленному перфорацией. Процесс дробления происходит непрерывно.

Оптимизация конструктивно-технологических параметров использования оснастки, которая основывается на разработанных математических моделях и общих рекомендациях [10], производится с учетом взаимного согласования параметров для каждой стадии по критерию (7) минимума затрат энергии (минимума импульса силы разделения) при ограничении на величину перемещения отделяемого элемента:

$$P_o \cdot t_u \Rightarrow \min, \quad (7)$$

$$x(t) \geq t_{nl},$$

где  $P_o$  – сила разделения;  $t_u$  – время действия ударной нагрузки;  $x(t)$  – деформация композита;  $t_{nl}$  – толщина пластины.

Оптимизируемыми параметрами являются амплитудное значение импульсной нагрузки ( $P_o$ ), радиус вала ( $R_e$ ) и расстояние ( $a$ ) между соседними местами внедрения конусных шипов. Величина перемещения  $x(t)$  определяется выражением (3).

Начальные области изменения параметров, результаты имитационных экспериментов и коэффициенты линейной регрессии, которые обуславливают соответствующие величины шагов движения по градиенту поверхности отклика, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Численные значения оптимизируемых параметров

Параметры	$P_o$ , кН	$R_e$ , м	$a$ , м	$x$ , м	$P_o \cdot t_u$ , Н·с
Верхний уровень	190	0,5	0,025		
Основной уровень	180	0,45	0,0235		
Нижний уровень	170	0,4	0,022		
Интервал варьирования	10	0,05	0,0015		
Имитационные эксперименты	+	+	+	0,0211	1504
	–	+	–	0,0193	1316
	+	–	–	0,0184	1264
	–	–	+	0,0161	1106
Коэффициенты регрессии	0,00152	–0,00002	0,0187		
Движение по градиенту	170	0,4	0,025	0,0164	1106
	168	0,445	0,024	0,0203	1092
	166	0,49	0,023	0,0249	1079
	164	0,535	0,022	0,0299	1066
	162	0,58	0,022	0,0324	1083

Начальное сочетание факторов при движении по градиенту характеризуется минимальным значением критерия оптимизации (строка 4 в таблице 3).

Результаты движения по градиенту показывают, что оптимальное сочетание параметров, устанавливаемое исходя из требования одновременного выполнения условий:

$$P_o = 164 \text{ кН}; R_e = 0,535 \text{ м}; a = 0,022 \text{ м},$$

достигается сравнительно быстро.

Для проверки эффективности технологической схемы разделения и результатов оптимизации конструктивно-технологических параметров проведены дополнительные лабораторные эксперименты. Испытания проведены на лабораторном оборудовании (разрывная машина ГМС-50 и гидравлический пресс ГП 1000) в два этапа:

- на первом этапе исследованы поведение материала и изменение усилия вдавливания конуса с углом  $30^\circ$  при локальном деформировании композита с определенным шагом;

- на втором этапе определено усилие среза, позволяющее отделить ослабленный по контуру элемент размером  $70 \times 70$  мм от пластины основного материала толщиной 30 мм. Для упрощения ударный срез заменен срезом при малой скорости, что допустимо, так как известен характер влияния скорости приложения нагрузки на величину энергии разрушения.

Образец для испытания – прямоугольная пластина  $380 \times 100 \times 30$  мм.

Конус, имеющий угол  $30^\circ$ , длину конической рабочей части 28 мм и твердость рабочей поверхности  $HRC \geq 42$ , вдавливался на полную длину рабочей части. Наибольшее по величине усилие требуется для первого внедрения в монолитный композит. Все последующие значения усилий меньше, что объясняется уменьшением прочности материала после очередной локальной деформации. Чем ближе расположены друг к другу места вдавливания конуса, тем сильнее обнаруживается влияние предыдущей деформации. Вдавливание конуса сопровождается расслоением материала тем более интенсивным, чем больше количество мест локальной деформации.

После ослабления материала по контуру отделяемого элемента осуществлялся второй этап эксперимента с помощью специального устройства (рис. 2). Элементы устройства располагаются на базовой плите 7, на которой закреплены с помощью кронштейнов 9, 10, 11 опоры 3, 4 и стойка 8. Образец композита 2 устанавливается на опоры (расстояние между ними 74 мм) так, чтобы отделяемый элемент был расположен между опорами. На поверхность отделяемого элемента через направляющую пластину 6 помещается толкатель 1, к которому прикладывается и регистрируется усилие среза.

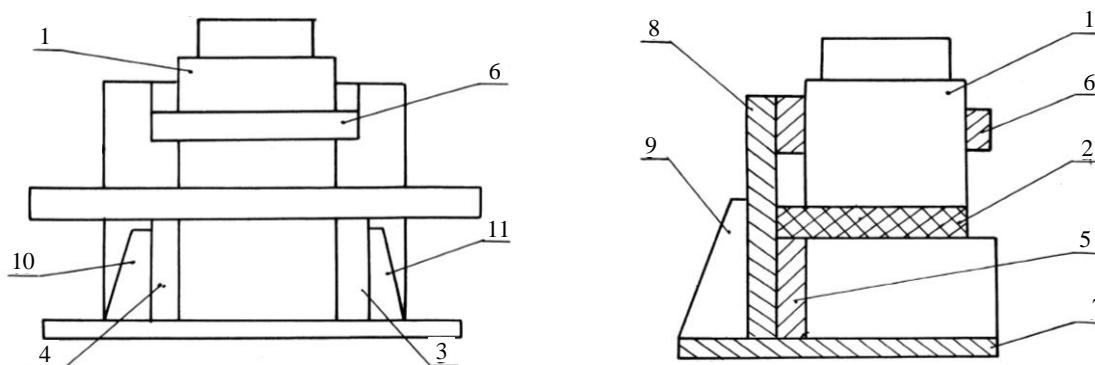


Рис. 2. Экспериментальное устройство

Отделение ослабленного по контуру элемента произошло при достижении усилия 630 кН. При этом отделенная часть распалась на слои (рис. 3), каждый из которых не превосходит по размерам заданные ограничения ( $70 \times 70$  мм).

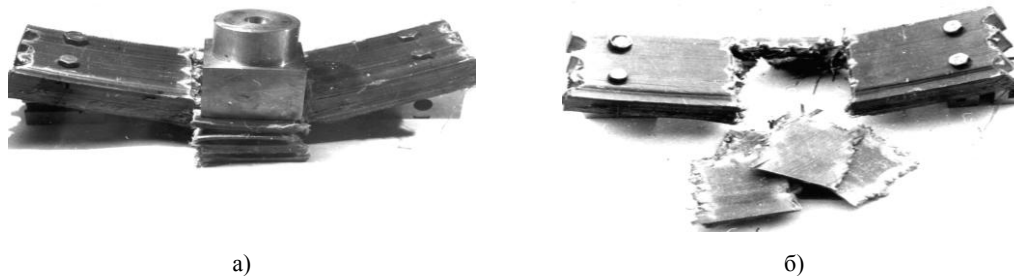


Рис. 3. Вид пластины композиционного материала после разделения:  
а – пластина с толкателем; б – пластина и отделенные фрагменты

**Заключение.** Использование системы математического моделирования, включающей моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений и оптимизацию параметров оснастки, позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для разделения пластин из композиционных материалов при их утилизации.

Для проверки эффективности технологической схемы разделения и результатов оптимизации конструктивно-технологических параметров проведены дополнительные лабораторные эксперименты. Полученные данные подтверждают результаты оптимизации конструктивно-технологических параметров технологической оснастки для разделения пластин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. – М.: Мир, 1970. – 672 с.
2. Ван Флек, Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Л. Ван Флек. – М.: Атомиздат., 1975. – 472 с.
3. Ясев, А.Г. Исследование технологических особенностей композиционных материалов при механической обработке / А.Г. Ясев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1996. – № 4 – 6. – С. 65 – 71.
4. Ясев, А.Г. Исследование механических свойств теплозащитных покрытий приборных отсеков / А.Г. Ясев // Зб. наук. праць Харк. ун-ту повітряних сил ім. Івана Кожедуба. – Харків, 2007. – Вип. 2. – С. 77 – 81.
5. Испытание материалов / под ред. Х. Блюменауэра. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.
6. Ясев, А.Г. Комплексный метод совершенствования технологической оснастки процессов обработки деталей металлургических машин / А.Г. Ясев // Сучасні проблеми металургії: наук. праці. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2007.
7. Ясев, А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении / А.Г. Ясев. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. – 237 с.
8. Ясев, А.Г. Моделирование дробления пластин из композитов / А.Г. Ясев // Математические проблемы технической механики. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – № 4. – С. 134 – 135.
9. Устройство для дробления пластин из композиционных материалов на полимерной основе: а. с. № 1556745 СССР, МКИ В 02 С 18/06, 4/02. / В.Н. Морозенко, А.Г. Ясев, Н.А. Мололкин, И.А. Маринченко, В.А. Бойко (СССР). – №4369007/31-33; заявл. 20.01.88; опубл. 15.04.90 // Бюл. – 1990. – №14. – 4 с.
10. Ясев, А.Г. Применение методов оптимизации технологических процессов / А.Г. Ясев // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения; под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова: в 10-ти т. – Одесса: ОНПУ, 2004. – Т. 8: Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – С. 163 – 217.

*Поступила 12.01.2009*