

## ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ТЕПЛОБМЕН В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ РАЗРЕЗАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПКМ ОТРЕЗНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

© 2017 С.А. Кобелев

Институт авиационных технологий и управления  
Ульяновского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 29.09.2017

Рассмотрено влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на теплообмен в зоне контакта при разрезании заготовок из ПКМ отрезными алмазными кругами. Доказано, что охлаждающая технологическая среда и способ её подачи влияют на тепловую напряжённость процесса разрезания полимерных композиционных материалов отрезными алмазными кругами. Подтверждены разработанные математические модели рассматриваемых задач теплообмена. Установлена связь теплового состояния контактирующих объектов с характеристиками охлаждающих технологических сред, характеристиками их подачи в зону обработки, с реальной формой взаимодействующих объектов и зоны контакта.

*Ключевые слова:* смазочно-охлаждающие технологические средства, теплообмен, зоне контакта, отрезные алмазные круги.

Как было установлено ранее [1, 2] величина плотности теплового потока  $q_c$  при разрезании заготовок алмазными отрезными кругами на разных отрезках режущей кромки определяется кинематическими параметрами процесса и температурой, распределенной по длине дуги контакта режущей кромки с заготовкой.

Поверхностная плотность теплового потока  $q_{ж}$ , отводящего из зоны контакта тепло на нагрев и парообразование смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), определяется зависимостью [1]:

$$q_{ж} = \begin{cases} \frac{c_{жс} G_{жс} (T - T_f)}{S}, T \leq T_f; \\ \frac{c_{нжс} G_{нжс} (T - T_f) + c_{жс} G_{жс} (T - T_f)}{S}, T > T_f, \end{cases} \quad (1)$$

где  $G_{жс}$ ,  $G_{нжс} = c_{жс} G_{жс} (T - T_f)/r$  – соответственно массовый расход СОЖ в парообразном и жидком состоянии проходящей через зону контакта круга и заготовки, кг/с;

$r$  – удельная теплота парообразования СОЖ, Дж/кг;

$T$  – температура насыщения СОЖ, К;

$T_f$  – температура потока СОЖ, К;

$c_{жс}$  – теплоемкость СОЖ, Дж/(кгК);

$G_{жс} = \rho_{жс} V_{жс}$ , где  $\rho_{жс}$  – плотность СОЖ, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{жс}$  – объём СОЖ, уносимой алмазонасыщенным слоем режущей кромки круга через зону контакта в единицу времени, м<sup>3</sup>/с.

$S$  – площадь контакта режущей кромки с заготовкой, м<sup>2</sup>

$$G_{ж} = G_{жт} + G_{жц} = \rho_{жс} (V_{жт} + V_{жц}), \quad (2)$$

где  $G_{жт}$ ,  $G_{жц}$  – соответственно массовый расход СОЖ, уносимой торцевой и цилиндрической поверхностями режущей кромки, кг/с;

$V_{жт}$ ,  $V_{жц}$  – соответственно объём СОЖ, уносимой торцевой и цилиндрической поверхностью режущей кромки в единицу времени, м<sup>3</sup>/с.

Объём СОЖ, уносимой торцевой поверхностью режущей кромки  $V_{жт}$  при отсутствии фазового перехода находится по [3]:

$$V_{жт} = \frac{1}{2} \pi (d_{pk1}^2 - d_{pk2}^2) (1 - \varepsilon_{pk3}) (1 - K_V) \overline{X}_3 n, \quad (3)$$

где  $d_{pk1}$ ,  $d_{pk2}$  – соответственно наружный и внутренний диаметры режущей кромки отрезного алмазного круга;

$$\varepsilon_{кр3} = \frac{h_{кр3}}{X_3} \quad \text{– относительная критическая}$$

глубина заделки алмазных зёрен в связке;

$h_{кр3}$  – критическая глубина заделки алмазных зёрен, м;

$\overline{X}_3$  – средневероятный размер алмазных зёрен, м;

$K_V$  – коэффициент, учитывающий объём, занимаемый алмазными зёрнами, выступающими из связки;

$n$  – частота вращения круга, с<sup>-1</sup>;

$$K_V = \frac{V_{l3} N_S}{X_3}, \quad (4)$$

где  $V_{l3} = 1/(4N_l)$  – объём единичного алмазного зерна, м<sup>3</sup>;

$N_l$  – количество алмазных зёрен в единице объёма, шт./м<sup>3</sup>;

Кобелев Станислав Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».  
E-mail: avia@ulstu.ru



$$\overline{Nu}_f = C \cdot Re_{fd}^m \cdot Pr_f^n \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (13)$$

где  $Pr_{fd} = \frac{W_{жф}}{\nu_f}$ ;  $\overline{Nu}_f = \frac{\alpha_3 d_3}{\lambda_{жф}}$ ;  $C, m, n$  – числовые

коэффициенты, выбираемые в зависимости от диапазона числа  $Re_{fd}$  в соответствии со следующей таблицей.

**Таблица 1.** Числовые коэффициенты

$Re_{fd}$	$C$	$m$	$n$
$5 \div 10^5$	0,5	0,5	0,38
$> 10^5$	0,25	0,6	0,43

Для определения коэффициента теплоотдачи от отрезаемой заготовки к СОЖ  $\alpha_3$  рассмотрим продольное обтекание заготовки по участку АВ, меняющему своё положение в процессе разрезания. При этом скорость потока находится по зависимости:

$$u_0 = K_{жс} \omega r_{pk} + u_{жс} \cos \alpha_1, \quad (14)$$

где  $K_{жс}$  – коэффициент, учитывающий разгон жидкости корпусом отрезного круга.

Коэффициент теплоотдачи от отрезаемой плоской заготовки-пластины к СОЖ при  $Re \leq 10^5$  можно получить аналогично в условиях обтекания заготовки ламинарным потоком по эмпирическому уравнению подобия:

$$\overline{Nu}_f = 0,06 \cdot Re_f^{0,5} \cdot Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

где

$$\overline{Nu}_f = \frac{\alpha_{пл} l_{AB}}{\lambda_{жф}}; \quad Pr_f = \frac{\mu_f C_{жф}}{\lambda_{жф}};$$

$$Pr_w = \frac{\mu_w C_{жв}}{\lambda_{жв}}; \quad Re_f = \frac{u_0 l_{AB}}{\nu_f},$$

$\alpha_{пл}$  – среднее на участке АВ значение коэффициента теплоотдачи от отрезаемой заготовки к СОЖ, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Если  $Re > 10^5$  (турбулентный режим течения), то:

$$\overline{Nu}_f = 0,0361 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (16)$$

При использовании вместо СОЖ аэрозоля, применение которого все более увеличивается [6], объём жидкости, уносимый алмазонасытым слоем режущей кромки через зону контакта в единицу времени, определяется по формуле:

$$V_{жс} = Q_a k_c, \quad (17)$$

где  $Q_a$  – расход аэрозоля, м<sup>3</sup>/с;

$k_c$  – коэффициент смачиваемости режущей

кромки, зависящий от скорости выхода аэрозоля из насадка.

В этом случае:

$$G_{жс} = \rho_{жс} Q_a k_c. \quad (18)$$

При подаче аэрозоля получаем следующие зависимости.

Участок АВ круга (см. рис. 2) принимаем как участок заготовки, продольно обтекаемой струей аэрозоля со скоростью  $u_0$ :

$$u_0 = \omega r_{pk} \pm u_{жс}, \quad (19)$$

где  $u_{жс} = g_{жс} / S_c$  – скорость истечения аэрозоля из насадка, м/с,

$g_{жс}$  – объёмный расход аэрозоля из насадка, м<sup>3</sup>/с;

$S_c$  – площадь выходного сечения насадка, м<sup>2</sup>.

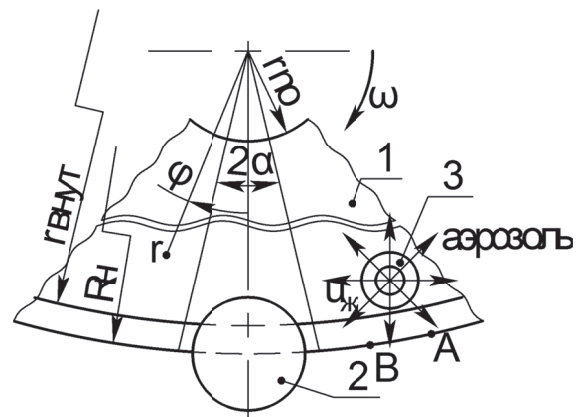
Окружная скорость отрезного круга меньше скорости истечения аэрозоля [6], из-за чего полагаем  $u_0 = u_{жс}$ .

Определим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{u_0 l_{AB}}{\nu_2} = \frac{\rho_{жс} u_0 l_{AB}}{\mu_2}, \quad (20)$$

где  $l_{AB}$  – длина дуги АВ, м;

$\nu_2, \mu_2$  – соответственно кинематический и динамический коэффициент вязкости распыляемой жидкости, Па·с.



**Рис. 2.** Расчётная схема для определения коэффициентов теплоотдачи:

1 – корпус отрезного круга; 2 – заготовка;

3 – сопло для подачи аэрозоля

Параметрам, выбираемым по температуре СОЖ на выходе из сопла, присвоим в обозначениях индекс  $f$ , как и в случае с обтеканием ламинарным потоком. Параметрам, выбираемым по средней температуре поверхности режущей кромки на участке АВ – индекс  $w$ .

Рассчитываем по эмпирическому уравнению подобия, полученному для турбулентного режима течения:

$$\overline{Nu}_f = 0,0296 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (21)$$

где  $\overline{Nu}_f = \frac{\overline{\alpha_{nl}} l_{AB}}{\lambda_{жф}}$ ;  $Pr_f = \frac{\mu_f C_{жф}}{\lambda_{жф}}$ ;

$Pr_w = \frac{\mu_w C_{жw}}{\lambda_{жw}}$ ;  $Re_f = \frac{u_0 l_{AB}}{\nu_f}$ ,

$\overline{\alpha_{nl}}$  – среднее на участке CD значение коэффициента теплоотдачи от отрезаемой плоской заготовки-пластины, к СОЖ, Вт/(м²К).

Проанализируем далее воздушное охлаждение.

Исследования [8], показали, что формирование воздушных потоков у отрезного круга начинается от планшайбы. Наиболее мощные потоки генерируются торцами алмазного круга. Наличие пор у абразивных кругов позволяет им достичь избыточного давления воздуха на периферии 0,03-0,05 МПа. Избыточное давление воздуха на режущей кромке алмазного круга можно считать близким к нулю. Поэтому прием, что теплоотдача к воздуху в процессе разрезания происходит за счёт свободного теплообмена.

Определим соответствующие коэффициенты теплоотдачи [4]:

$$a_{св} = \frac{Nu_m \lambda_m}{d_3} \tag{22}$$

Определяющая температура:

$$T_m = \frac{T_B + T_{pk3}}{2} \tag{23}$$

Теплофизические свойства воздуха при температуре  $T_m$ :

$$\lambda_{вм} = \lambda_{в}(T_m); \mu_{вм} = \mu_{ж}(T_m); c_{вм} = c_{ж}(T_m). \tag{24}$$

Тогда:

$$Nu_m = C_1 Ra_m^{n_1}, \tag{25}$$

где коэффициенты  $C_1, n_1$  определяются из следующей таблицы:

**Таблица 2.** Значения коэффициентов

$Ra_m$	$C_1$	$n_1$
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,250
$2 \cdot 10^7 \div 10^{15}$	0,135	0,333

$$Ra_m = Gr_m Pr_m, \tag{26}$$

где  $Ra_m$  – число Рэлея;  $Gr_m$  – число Грасгофа:

$$Gr_m = \frac{g d_3^3 \rho_m^2 (T_{3w2} - T_6) \beta_m}{\mu_6^2}, \tag{27}$$

$g$  – ускорение свободного падения, м/с²,

$\beta = T_m^{-1}$  – коэффициент объёмного расширения воздуха;

$$Pr_m = \frac{\mu_{см} c_{см}}{\lambda_{см}}. \tag{28}$$

Шероховатость получаемой поверхности может быть оценена по формуле, предложенной [7]:  $R_z = -2,1 + 0,098v - 0,005s + 0,029Z + 0,001lv_s$ . (29)

Таким образом, охлаждающая технологическая среда и способ её подачи влияют на тепловую напряжённость процесса разрезания полимерных композиционных материалов отрезными алмазными кругами. Это видно через изменение следующих показателей:

1) поверхностной плотности теплового потока, отводимого из зоны контакта за счёт нагрева и парообразования СОЖ (см. [2] зависимость (1));

2) коэффициентов теплоотдачи на участках свободных поверхностей режущей кромки и корпуса отрезного алмазного круга и заготовки, контактирующих с СОЖ (см. [2] – и зависимости, определяющие  $\alpha_{pk}, \alpha_k, \alpha_3, \alpha_{nl}$ ).

Ранее были разработаны математические модели см. [2], задач теплообмена при разрезании заготовок из полимерных композиционных материалов алмазными отрезными кругами. В моделях показана связь теплового состояния контактирующих объектов с характеристиками охлаждающих технологических сред, характеристиками их подачи в зону обработки, с реальной формой взаимодействующих объектов и зоны контакта. Это поможет найти оптимальные условия подачи СОЖ при разрезании для минимизации температурных напряжений, то есть, в итоге, улучшить качество получаемых деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев Е.С. Ковальников В.Н. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования. Ульяновск: УлГТУ, 2002. 139 с.
2. Кобелев С.А., Ширялкин А.Ф., Данилов Г.И. К вопросу о разработке математической модели теплообмена при разрезании заготовок из ПКМ отрезными алмазными кругами // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: статьи и тезисы докладов 4 Межд.науч. практ. конф. (16-17 октября 2014 г., г. Ульяновск: УлГУ, 2014. С. 152-163.
3. Крупенников О.Г. Повышение эффективности операции разрезания заготовок из полупроводниковых и диэлектрических материалов на пластины алмазным отрезным кругом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Ульяновский политехнический институт. Ульяновск, 1994. 282 с.
4. Семко М.Ф. Работоспособность алмазных кругов. Киев: Техника, 1983. 95 с.
5. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.
6. Клушин М.И. Охлаждение и смазка распылёнными

- ми жидкостями при резании металлов. Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1966. 124 с.
7. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. 176 с.
8. Кобелев С.А., Данилов Г.И. К вопросу о воздушных потоках, генерируемых алмазным отрезным кругом // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(3). С. 885-886.

**INFLUENCE OF LUBRICATING-COOLING TECHNOLOGICAL MEANS ON HEAT EXCHANGE IN THE CONTACT ZONE WHEN CUTTING BLANKS FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH CUT-OFF DIAMOND CIRCLES**

© 2017 S.A. Kobelev

Institute of Aviation Technologies and Management  
of Ulyanovsk State Technical University

The influence of lubricating-cooling technological means on the heat exchange in the contact zone is considered when cutting the workpieces from PCM with cut-off diamond circles. It is proved that the cooling technological medium and the method of its supply affect the thermal tension of the process of cutting polymeric composite materials by cutting diamond circles. The developed mathematical models of the heat exchange problems under consideration have been confirmed. The relationship of the thermal state of the contacting objects with the characteristics of the cooling technological media, the characteristics of their supply to the treatment zone, the real form of the interacting objects and the contact zone is established.

*Keywords:* lubricating-cooling technological means, heat exchange, contact zone, cutting diamond circles.