

## РАЗДЕЛ II. КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 621.923.04: 669.295

С.С.Силин, И.С.Рыкунов

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ БЕСПРИЖОГОВЫХ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Трудность шлифования титановых сплавов заключается в получении необходимого качественного поверхностного слоя изделия. Высокая температура, возникающая при шлифовании титановых сплавов и обусловленная их специфическими свойствами (низкая теплопроводность, высокая химическая активность, низкий модуль упругости и др.), ставит перед работниками в области обработки металлов резанием важную задачу — научиться быстро и надежно назначать бездефектные (в частности, бесприжоговые) режимы шлифования этих сплавов.

Использование математического аппарата для изучения тепловых явлений при шлифовании позволяет разработать аналитические методы расчета бездефектных режимов резания.

Аналитические исследования быстродвижущегося плоско-ограниченного источника тепла и анализ температурного поля при действии источника тепла на поверхности режущего зерна в виде полуконуса произвольной формы дают возможность получить довольно точное уравнение баланса механической и тепловой энергии (I), которое устанавливает связь режимов шлифования ( $V_k$ ,  $V_g$ ,  $S$  и  $t$ ) с физико-механическими свойствами обрабатываемого металла и шлифовального круга

$$\pi P_z V_k = 0,885 \lambda_g B \sqrt{\frac{V_g l}{a_g}} \theta_m + \frac{\sqrt{\pi} (\lambda c p)_z V_k t^2 t g \varepsilon (0,5 T \sin \varepsilon + 2 \frac{\Delta \cos \varepsilon}{t}) \eta \pi p_z \theta_m}{4 \psi \sqrt{r}} \quad (I)$$

$$+ 0,5B \sqrt{V_g (Cp)_g \theta_m}$$

где первое, второе и третье слагаемые - доли тепла от общей выделившейся теплоты в зоне резания, уходящие в деталь ( $Q_d = q \cdot V \ell$ ), шлифовальный круг ( $Q_k = q_i S_i \eta \cdot \text{Пр.з}$ ) и стружку ( $Q_c = V (Cp)_g \theta_m$ );  $P_z$  - тангенциальная сила резания, Н;  $\theta_m$  - максимальная поверхностная температура шлифования, °C;  $V_k$  - скорость шлифовального круга,

$\frac{м}{сек}$ ;  $V_g$  - продольная подача шлифуемой детали (стола), м/сек;  $B$  - ширина шлифуемого изделия, м;  $\ell = \sqrt{V t}$  - длина дуги контакта, м;  $D$  - диаметр круга, м;  $t$  - глубина шлифования, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности детали и режущих зерен,  $\frac{дж}{м \cdot сек \cdot град}$ ;  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности,  $\frac{м^2}{сек}$ ;

$Cp$  - удельная объёмная теплоёмкость,  $\frac{дж}{м^3 \cdot град}$ ;  $q_i$  - интенсивность быстродвижущегося плоско-ограниченного источника тепла,

$\frac{дж}{м^2 \cdot сек}$ ;  $q_i S_i$  - соответственно интенсивность теплового потока,  $\frac{дж}{м^2 \cdot сек}$  и площадь контакта для принятой схемы зерна,  $м^2$ ;

$\epsilon$  - угол при вершине режущего зерна, град;  $\Delta$  - ширина контакта зерна с деталью, м;  $\eta$  - коэффициент разноразмерности режущих зерен;  $\text{Пр.з}$  - количество режущих зерен на площади контакта;  $\psi$  - безразмерный коэффициент. Для рациональных режимов шлифования его можно принять равным 1.

Чтобы не устанавливать зависимости влияния отдельных технологических параметров обособленно друг от друга на обрабатываемость того или иного материала, представим уравнение (I) в критериальном виде. Это позволит найти зависимости между группами - безразмерными критериями подобия, включающими в себя ряд параметров процесса шлифования, уменьшить число изучаемых переменных и резко сократить количество экспериментальных исследований. После ряда алгебраических преобразований выражение (I) может быть представлено в виде критериальной зависимости

$$A = 0,885 \sqrt{Pe} (1 + 0,5B \sqrt{Vg} + 0,565D \sqrt{Pe}), \quad (2)$$

где

$A = \frac{n P_z V_k}{B \lambda_g \theta_m}$  - критерий Кирпичева, характеризующий тепловую активность детали ( $\frac{\lambda_g}{l} \theta_m$ ,  $\frac{дж}{м^2 \text{ сек}}$ ) по отношению

к интенсивности общего тепловыделения ( $\frac{n P_z V_k}{B l}$ ,  $\frac{дж}{м^2 \text{ сек}}$ );

$Pe = \frac{V_g l}{\alpha_g}$  - критерий Пекле, отражающий влияние режимных условий ( $V_g l$ ) и теплофизических свойств обрабатываемого материала на характер протекания процесса шлифования;  $B =$

$\frac{t^2 t_g \epsilon (0,5 J \sin \epsilon + 2 \frac{\Delta \cos \epsilon}{t}) \cdot n p_z}{l B}$  - критерий, учитывающий

геометрию режущих зерен для принятой конусообразной формы и режимные условия ( $\frac{t^2}{l B}$ );  $B = \frac{V_k}{V_g}$  - критерий, отражающий

режимные условия;  $\Gamma = \frac{(\lambda_{cp})_z}{(\lambda_{cp})_g}$  - критерий, учитывающий теплофизические свойства детали и зерен шлифовального круга;  $\mathcal{D} = \frac{t}{l}$  -

- критерий, учитывающий геометрию зоны шлифования. Критерии  $Pe$ ,  $B$ ,  $\Gamma$  и  $\mathcal{D}$  являются определяющими, так как входящие в них величины известны до опыта. Критерий  $A$  относится к числу неопределяющих критериев, так как параметры  $P_z$  и  $\theta_m$  зависят от величин, входящих в определяющие критерии. Согласно теории подобия неизменность определяющих критериев  $Pe$ ,  $B$ ,  $\Gamma$  и  $\mathcal{D}$ , независимо от величины значений отдельных параметров входящих в них, делает подобными между собой процессы шлифования, которые в этом случае имеют одно и то же значение критерия  $A$ .

Так как уравнение (2) выражает общую теоретическую зависимость между параметрами процесса шлифования, то из него могут быть получены различные частные формулы. Например, для максимальной поверхностной температуры имеем

$$\theta_m = \frac{n P_z V_k}{0,885 B \lambda_g \sqrt{Pe} (1 + 0,5 B \sqrt{B \Gamma} + 0,565 \mathcal{D} \sqrt{Pe})} \quad (3)$$

Температуры, полученные из выражения (3), удовлетворительно совпадают с данными эксперимента. Так при шлифовании сплава ВТЗ-1 кругом К340СМ2К5,  $V_k = 35$  м/сек,  $V_g = 0,2$  м/сек,  $B = 0,01$  м

$t = 0,000\ 020$  м,  $\lambda_g = 13,5$ ,  $\lambda_z = 12,1$  в  $\frac{дж}{м \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$ ,

$$(\lambda \rho)_g = 2,72 \cdot 10^6, (\rho)_z = 1,84 \cdot 10^6 \text{ в } \frac{\text{дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}, \alpha_g = 5 \cdot 10^{-6},$$

$$\alpha_z = 6,37 \cdot 10^{-6} \text{ в } \frac{\text{м}^2}{\text{сек}} [1,4], \Delta = 0,000322 \text{ м}, \eta =$$

$$= 0,3 [4], \rho_{r,z} = 10\% \rho, \text{ где } \rho = 4,2 \frac{\text{шт}}{\text{мм}^2} [5,4],$$

$\rho_z = 27 \text{ н}$ , получена расчетная температура  $\theta_m = 780^\circ \text{С}$ . Измеренная с помощью полуприкусственной срезаемой термпары температура  $\theta_m$  составила  $730^\circ \text{С}$  (рис.2). Полученные расхождения вполне объяснимы.

При рациональных режимах шлифования теоретическая зависимость  $A = f(\rho_e, B, D, V, \Gamma)$  может быть описана функцией степенного вида

$$A = C_1 \rho_e^{n_1} B^{n_2} D^{n_3} V^{n_4} \Gamma^{n_5}. \quad (4)$$

Проведенный анализ показал, что при постоянном значении критерия  $\Gamma = \frac{(\lambda \rho)_z}{(\lambda \rho)_g}$  для данного шлифуемого материала и выбранного круга уравнение (4) с погрешностью не более 6% может быть упрощено и представлено в виде

$$A = C_1 \rho_e^{n_1}. \quad (5)$$

Это значительно упрощает определение бесприжоговых режимов шлифования в производственных условиях.

На рис.1 построена теоретическая зависимость  $A = 0,885 \rho_e^{0,51}$  при средних значениях  $(\lambda \rho)_g$  для группы исследуемых сплавов, которая удовлетворительно совпадает с зависимостями  $A = f(\rho_e)$ , полученными экспериментальным путем для сплавов ВТ20 ( $A = 0,93 \rho_e^{0,51}$ ), ОТ4 ( $A = 0,886 \rho_e^{0,50}$ ) и ВТЗ-Г ( $A = 1,47 \rho_e^{0,41}$ ).

Критериальные уравнения степенного вида, полученные теоретически или экспериментально, позволяют вплотную подойти к решению проблемы, связанной с разработкой метода определения бесприжоговых режимов шлифования. Для этого достаточно подставить в них значение максимально допустимой температуры шлифования  $\theta_m$ , превышение которого приводит к систематическому появлению прижогов на поверхности шлифуемого изделия, и значение силы  $\rho_z$ , определенное по формуле вида

$$\rho_z = \frac{c B t^x V_g^y}{V_k^z} \text{ н.}$$

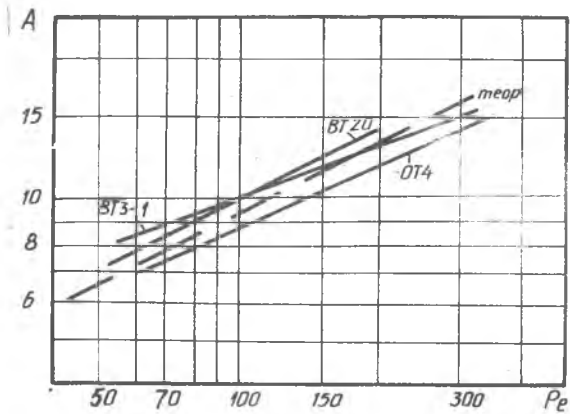


Рис.1. Критериальные зависимости  $A = f(Pe)$  для титановых сплавов

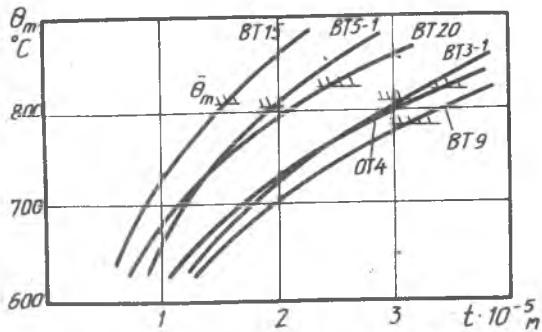


Рис.2. Зависимости  $\theta_m = f(t)$  при  $V_k = 35 \frac{m}{сек}$ ,  $V_g = 0,167 \frac{m}{сек}$ ,  $B = 0,01 m$ . Круг К340СМ2К5.  $\bar{\theta}_m$  - температура прижога

Определив  $C_T$  и  $n_1$ , решив уравнение (5) относительно скорости  $V_g$ , которая на шлифовальных станках поддается плавному регулированию в широких пределах, получим уравнение для определения продольной скорости детали, при заданных значениях  $B$  и  $t$

$$V_g = \left( \frac{c t^{x-0,5n} V_k^{1-z} a_g^n}{c_1 \lambda_g \bar{\theta}_m \bar{\theta}^{0,5n}} \right)^{\frac{1}{n-y}} \frac{м}{сек} \quad (6)$$

В связи с отсутствием надежной теоретической формулы для определения  $\rho_z$  проведены экспериментальные исследования на плоско-шлифовальном станке мод. SFW315 при шлифовании образцов из титановых сплавов с  $B = 0,01$  м кругом K340CM2K5 с одновременным измерением  $\rho_z$  и  $\bar{\theta}_m$ . Результаты экспериментов приведены на рис.2 и в таблице I.

Таблица I

Шлифуемый сплав	c	x	y	z	ср	a	λ	$\bar{\theta}_m$
BT15	$0,908 \cdot 10^8$	0,66	0,25	0,76	$2,72 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-6}$	13,4	805
BT5-I	$0,706 \cdot 10^8$	0,65	0,22	0,75	$2,68 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	12,5	800
BT20	$0,620 \cdot 10^8$	0,63	0,24	0,78	$2,72 \cdot 10^6$	$5,08 \cdot 10^{-6}$	13,8	835
BT9	$0,550 \cdot 10^8$	0,61	0,23	0,80	$2,76 \cdot 10^6$	$4,53 \cdot 10^{-6}$	12,5	785
BT3-I	$0,493 \cdot 10^8$	0,61	0,26	0,79	$2,72 \cdot 10^6$	$4,93 \cdot 10^{-6}$	13,4	810
OT4	$0,490 \cdot 10^8$	0,62	0,27	0,78	$2,72 \cdot 10^6$	$5,23 \cdot 10^{-6}$	14,2	830

После каждого эксперимента образцы травились в специальных растворах и протравленные поверхности проверялись на прижоги. При наличии участков поверхности с измененной структурой фиксировалась измеренная при этом режиме температура шлифования. Таким образом для каждого сплава определялись значения максимальной-допустимой температуры  $\bar{\theta}_m$ . На рис.2 приведены экспериментальные температурные зависимости, на которых отмечены температурные границы для каждой марки шлифуемого сплава и для удобства аналитических расчетов дана общая граница температур  $\bar{\theta}_m = 780 - 800^\circ\text{C}$ .

Нужно отметить, что полученные температурные зависимости впол-

не согласуются с выводами, сделанными в работах [2,3], о целесообразности классификации при механической обработке титановых сплавов по характеру их структуры ( по тепловой активности структурных составляющих). Как видно из рис.3, наибольшие температуры получены при шлифовании сплава BT15 ( $\beta$  - сплава) и наименьшие для сплавов BT3-1, BT9 и OT4 с ( $\alpha + \beta$ ) структурой. Такая классификация позволяет иметь усредненные значения коэффициентов  $C_T$ ,  $P_T$  для группы сплавов и дает возможность прогнозировать режимы резания (см.таблицу I).

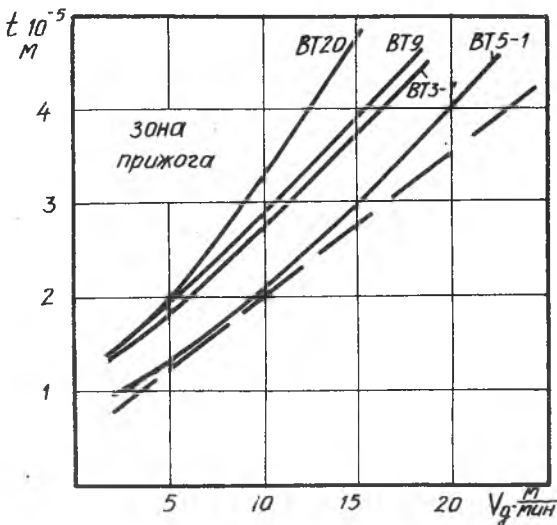


Рис.3. Зона бесприжоговых режимов при плоском шлифовании титановых сплавов. Круг КЗ40СМ2К5,  $V = 0,01$  м,  $V_k = 35 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$

На основании изложенного основные положения предлагаемой методики назначения бесприжоговых режимов шлифования можно сформулировать следующим образом:

I. Из справочной литературы определяются значения теплотехнических характеристик, входящих в критерии  $A$  и  $P_e$ .

2. Для числовых значений определяющего критерия  $Re$  подсчитываются числовые значения критерия  $A$ .
3. Результаты расчетов наносятся на двойную логарифмическую сетку и устанавливается критериальная зависимость вида  $A = C_1 Re^n$ .
4. Решая ее относительно продольной скорости детали, получаем уравнение для назначения бесприжоговых режимов шлифования.

Для группы исследуемых сплавов (см. таблица № I) при среднем значении тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , равном

$$P_z = 0,62 \cdot 10^8 \frac{Bt^{0,62} \cdot V_g^{0,24}}{V_k^{0,38}} \text{ Н,}$$

и температуре  $\bar{\theta}_m = 800^\circ\text{C}$ , критериальная зависимость (5) принимает вид  $A = 1,7 Re^{0,42}$ , откуда

$$V_g = \left( \frac{0,62 \cdot 10^8 Bt^{0,41} V_k^{0,22} a_g^{0,42}}{1,7 \lambda_g \bar{\theta}_m^{0,27}} \right)^{5,56} \text{ м/сек.} \quad (7)$$

На рис.3 представлены расчетная (пунктирная прямая) и установленные экспериментально граничные кривые бесприжоговых режимов шлифования для сплавов BT20, BT9, BT3-I, BT5-I.

Выражение (7) дает расчетные значения параметра  $V_g$ , при заданных глубинах шлифования  $t$ , достаточно хорошо совпадающие с экспериментальными значениями и, таким образом, может использоваться для назначения бесприжоговых режимов при плоском шлифовании титановых сплавов.

### Литература

1. Сидин С.С. Исследование процессов резания методами теории подобия. Труды РВТИ, № I, издательство "Верхняя Волга", - 1966.
2. Под редакцией Петрухи П.Г. Резание труднообрабатываемых материалов, "Машиностроение", М., 1972.
3. Кривоухов В.А. и Чубарев А.Д. Обработка титановых сплавов резанием, "Машиностроение", М., 1970.
4. Резников А.Н. Теплофизика резания. Машиза, М., 1969.
5. Сарабуневич В.Н. Исследование плотности распределения и шага зерен в абразивных инструментах. Труды Л.П.М. № 298, 1968.