

"Производительность и качество при обработке жаропрочных и титановых сплавов", вып.3, КуАИ, 1967.

5. Ж е л е з н о в Г.С. О расчете сил, действующих при разрывании. В сб.: "Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов", вып.3, КуАИ, 1970.

## А Б Р А З И В Н О - А Л М А З Н А Я    О Б Р А Б О Т К А И    М Е Т О Д Ы    Е Е    У Л У Ч Ш Е Н И Я

УДК 621.923

Ф.П. Урывский

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Большое количество теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отечественными учеными, посвящено изучению закономерностей формирования поверхностного слоя деталей при абразивной обработке. Анализ результатов этих исследований показывает, что при шлифовании жаропрочных и титановых сплавов и высокопрочных сталей доминирующим фактором, оказывающим решающее влияние на свойства поверхностного слоя детали, является тепловой. Нагрев поверхностных слоев деталей до высоких температур приводит к образованию растягивающих остаточных напряжений, микротрещин, появлению прижогов, насыщению поверхностных слоев газами, перераспределению легирующих элементов в материале.

В своих работах большинство авторов рассматривают влияние максимальной температуры на состояние поверхностного слоя.

Не умаляя важности этих работ, необходимо отметить, что процесс шлифования является высокоскоростным, значения температур, соответствующих началу отпуска, закалке, росту зерна и др., зависят не только от температуры нагрева, но и от времени пребывания металла при данной температуре, что определяется временем действия теплового источника и скоростями нагрева и охлаждения. Поэтому значения критических температур, при которых происходят фазовые и структурные изменения, газонасыщение и др., полученные при медленном (печном) нагреве, не соответствуют аналогичным

температурам для термического цикла, который имеет место при шлифовании.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей формирования поверхностных слоев деталей и методов управления качеством поверхности при абразивной обработке титанового сплава BT9 и высокопрочной стали ЭИ643.

Изучение влияния параметров термического цикла на характер фазовых и структурных изменений, происходящих в нагретых слоях металла, проводилось на специальной установке [1], обеспечивающей условия, тождественные условиям шлифования, и на образцах, обработанных на модернизированном станке ЗИ2М, позволяющем изменять скорости движения детали от 1 до 150 м/мин.

Структура и фазовый состав исследовались на дифрактометре УРС 50-ИМ и микроскопе МБС-1. Количество  $\beta$ -фазы в титановом сплаве определялось по методике М.И. Ермоловой. Распределение размеров блоков и искажений второго рода (характеристик тонкой структуры) определялось по методике, приведенной в [2], остаточные напряжения - по методу Н.Н. Давиденкова.

Опытами установлено, что количество  $\beta$ -фазы в титановом сплаве BT9 в зависимости от скорости и температуры нагрева может изменяться от 2 до 28%, а остаточного аустенита в стали ЭИ643 - от 5 до 47%. Значения температур, соответствующих переходу  $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$ , и температур, соответствующих отпуску и вторичной закалке при нагреве стали, в значительной степени зависят от скоростей нагрева и охлаждения. Увеличение скорости нагрева титанового сплава BT9 от  $1,5 \cdot 10$  до  $5 \cdot 10^3$  °C/с приводит к повышению температуры перехода  $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$  от 780 до 890 °C и температуры, соответствующей наибольшему количеству  $\beta$ -фазы, от 890 до 1100 °C. При нагреве до температур 1250-1300 °C количество  $\beta$ -фазы уменьшается до 2%.

Для стали ЭИ643 увеличение скорости нагрева в указанном диапазоне приводит к повышению температуры начала распада аустенита от 250 до 330 °C, а температура, при которой повышается количество остаточного аустенита, увеличивается от 880 до 990 °C. Образование альфированного слоя в титановом сплаве происходит при температурах 800-850 °C и более, при времени их действия не менее  $t = (5 \dots 7) \cdot 10^{-2}$  с. Рост зерна наблюдается при температурах 1200 + 1250 °C, если время их действия превышает  $(2 \dots 6) \cdot 10^{-1}$  с.

При нагреве поверхностных слоев до температуры  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  изменение времени действия теплового источника от  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  с приводит к уменьшению глубины фазовых изменений в поверхностном слое титанового сплава в 2,5...3, а стали ЭИ643 - в 1,5... 2 раза.

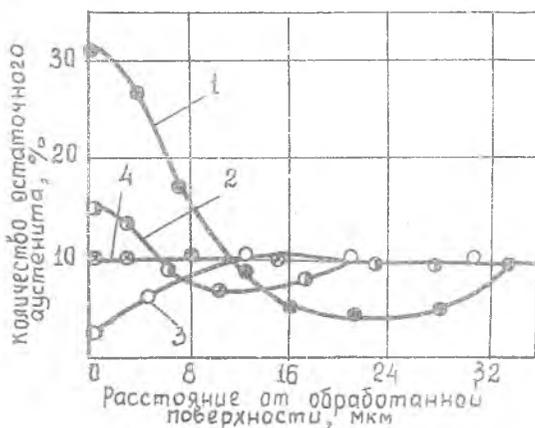
Из приведенных данных видно, что увеличение скоростей нагрева и охлаждения и уменьшение времени действия теплового источника приводит к повышению значения температур, при которых происходит фазовые и структурные изменения в металле, и к снижению глубины их провякновения. Уменьшить время действия теплового источника и увеличить скорости нагрева и охлаждения при шлифовании можно за счет увеличения скорости движения детали, применения наиболее эффективных методов охлаждения и кругов с прерывистой режущей рабочей поверхностью.

Исследование влияния скорости движения детали на величину и характер остаточных напряжений, фазовые изменения и параметры тонкой структуры проводились на круглошлифовальном станке ЗИ2-М. Высокопрочная сталь ЭИ643 обрабатывалась кругами ЭБ25СМЛК7, в качестве охлаждающей жидкости применялся 3%-й раствор водомасляной эмульсии. Обработка титанового сплава ВТ9 проводилась кругами КЗ25СМЛК7, охлаждение - 10%-ым водным раствором нитрида натрия.

На рис.1 показано влияние скорости движения детали на распределение остаточного аустенита в поверхностном слое при шлифовании стали ЭИ643. Режим обработки:  $V_{кр} = 45$  м/с;  $S_n = 0,5$  мм/мин;  $t = 0,01$  мм/пр. Из рисунка видно, что при изменении скорости движения детали от 15 до 64 м/мин. количество остаточного аустенита уменьшается от 32 до 22%. При скорости  $V_d = 15$  м/мин в поверхностном слое толщиной до 11 мкм количества остаточного аустенита увеличивается. Полученные результаты свидетельствуют о том, что эти слои металла в процессе обработки подверглись вторичной закалке. Слои, расположенные на глубине от 11 до 33 мкм, получили отпуск, что подтверждает уменьшение количества остаточного аустенита. Увеличение скорости движения детали до 46 м/мин приводит к снижению количества остаточного аустенита ( по сравнению с  $V_d = 15$  м/мин) и к уменьшению толщины вторично закаленного и отпущенного слоев. При работе на скоростях  $V_d = 64$  м/мин поверхностные слои металла подверга-

гаются отпуску, при  $V_d = 85$  м/мин количество остаточного аустенита не изменяется.

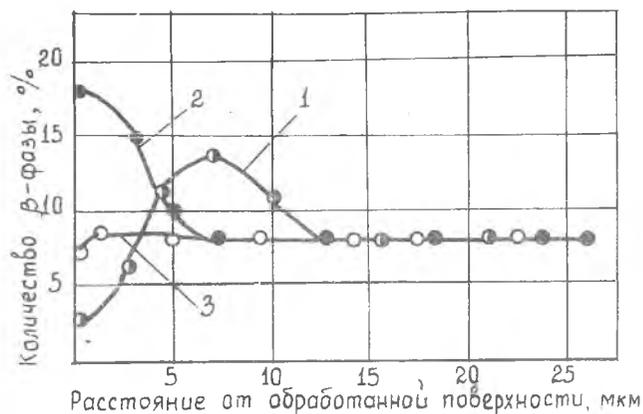
Такой характер распределения остаточного аустенита объясняется снижением контактной температуры и уменьшением времени действия теплового источника с увеличением скорости детали. Чем больше температура в зоне контакта превышает температуру полного распада мартенсита, тем больше образуется остаточного аустенита и тем больше глубина вторично закаленного и отпущенного слоев. Следует отметить, что температура вторичной закалки превышает температуру, соответствующую точке  $A_{c3}$ .



Р и с.1. Распределение остаточного аустенита в поверхностном слое (обрабатываемый материал ЭИ643): 1-4 соответственно  $V_d = 15, 46, 64, 85$  м/мин

На рис. 2 показано влияние скорости детали на изменение количества  $\beta$ -фазы в поверхностных слоях детали. Режим шлифования:  $V_{кр} = 45$  м/с;  $S_n = 0,5$  м/мин;  $t = 0,01$  мм/пр. Из рис. 2 видно, что при шлифовании титанового сплава ВТ9 изменение скорости детали от 15 до 55 м/мин приводит к изменению количества  $\beta$ -фазы на 18%. При  $V_d = 15$  м/мин в поверхностных слоях до 4 мкм имеет место уменьшение  $\beta$ -фазы на 5% по сравнению с исходной структурой, на глубине от 5 до 12 мкм количество  $\beta$ -фа-

зи увеличивается. Уменьшение  $\beta$  - фазы в поверхностных слоях происходит в результате воздействия высоких температур. При таких температурах значительная часть  $\alpha$  - фазы переходит в  $\beta$  - фазу, но увеличение количества  $\beta$  - фазы в нагретом состоянии



Р и с.2. Изменение фазового состава в поверхностном слое (обрабатываемый материал ВТ9): 1 - 3 соответственно  $v = 15, 25, 55$

приводит к ее обеднению  $\beta$  - стабилизирующими элементами.

При охлаждении сильно обедненная легирующими элементами  $\beta$  - фаза не фиксируется, а переходит в пересыщенный твердый раствор  $\alpha'$  или  $\alpha''$ . Повышение  $\beta$  - фазы по сравнению с исходным материалом имеет место при более низких температурах, при которых в  $\beta$  - фазе содержится необходимое количество  $\beta$  - стабилизирующих элементов, способных зафиксировать  $\beta$  - фазу при быстром охлаждении.

Увеличение скорости движения детали до  $v_d = 55$  м/мин позволяет получить поверхностный слой, в котором количество  $\beta$  - фазы соответствует исходному материалу. Объясняется это тем, что с увеличением скорости детали до 55 м/мин контактная температура снижается.

Важным критерием, определяющим состояние поверхностного слоя деталей, является величина остаточных напряжений, которые оказывают существенное влияние на усталостную прочность деталей.

На рис. 3 показано влияние скорости детали на остаточные напряжения при обработке стали ЭИ643. Режим шлифования:  $v_{кр} = 46$  м/сек;  $t = 0,01$  мм/пр;  $S_n = 0,5$  м/мин.



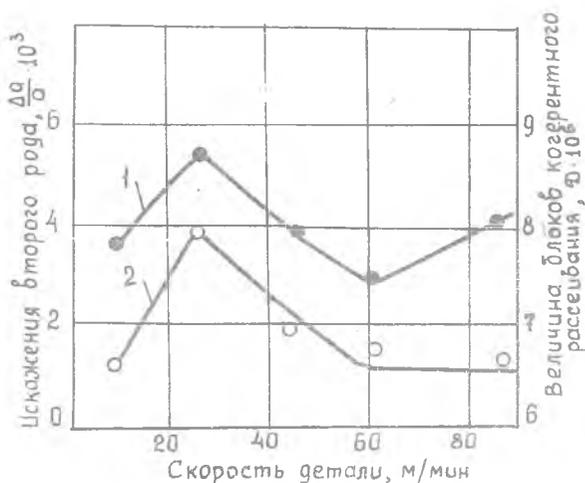
Р и с.3. Тангенциальные остаточные напряжения. Обработываемый материал ЭИ643. 1 -  $v_d = 15$  м/мин; 2 -  $v_d = 46$  м/мин; 3 -  $v_d = 64$  м/мин; 4 -  $v_d = 85$  м/мин

Из приведенных данных видно, что увеличение скорости детали приводит к снижению растягивающих остаточных напряжений и к уменьшению глубины их залегания. Объясняется это тем, что в результате увеличения скорости детали снижается максимальная температура, увеличиваются скорости нагрева и охлаждения и уменьшается глубина проникновения критических температур, при которых образуются остаточные напряжения. При скорости  $v_d = 15$  м/мин растягивающие напряжения достигают  $40$  кгс/мм<sup>2</sup>. К таким изменениям приводят высокие контактные температуры, которые вызывают пластические деформации в поверхностных слоях детали и фазовые изменения.

С увеличением скорости до  $46$  м/мин максимальная величина растягивающих напряжений снижается, уменьшается глубина их залегания, но повышается градиент напряжений по глубине поверхностного слоя. Дальнейшее возрастание скорости детали приводит к увеличению силы резания и к снижению температуры нагрева поверхностных слоев. Это повышает роль силового фактора в об-

разовании остаточных напряжений сжатия. На скоростях резания  $v_d > 64$  м/мин доминирующим фактором в образовании остаточных напряжений является силовой.

Процессы, происходящие в поверхностных слоях деталей, оказывают своеобразное влияние на параметры тонкой структуры. На рис.4 показано влияние скорости детали на характеристики тонкой



Р и с. 4. Влияние скорости детали на характер изменения микронапряжений и величины блоков когерентного рассеивания (обрабатываемый материал ЭИ643) : 1 —  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$  ; 2 —  $\Phi$

структуры. Режим шлифования:  $v_{кр} = 45$  м/с;  $t = 0,01$  мм/пр ;  $S_n = 0,5$  м/мин.

Изменение характеристик тонкой структуры поверхностных слоев деталей при шлифовании обусловлено влиянием не только температурного, но и силового факторов. Из анализа полученных данных видно — увеличение скорости до  $v_{кр} = 25$  м/мин приводит к увеличению размеров блоков и искажений второго рода. При дальнейшем увеличении скорости детали происходит измельчение блоков мозаики, а искажения второго рода уменьшаются до  $v_d = 60$  м/мин; дальнейшее повышение скорости резания приводит к увеличению искажений второго рода. При шлифовании стали ЭИ643 на указанных

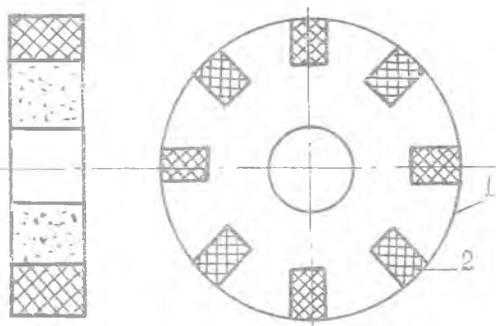
режимах наблюдается изменение блоков мозаики от  $6 \cdot 10^{-6}$  до  $8,9 \cdot 10^{-6}$  и тонкой кристаллической структуры - от  $2,5 \cdot 10^{-3}$  до  $5,3 \cdot 10^{-3}$ .

Причиной сильного искажения тонкой кристаллической структуры аустенита и мартенсита может быть механический наклеп, процесс пластической деформации при шлифовании и фазовый наклеп, возникающий в результате проходящего в короткое время перехода  $\alpha - \gamma$  с мгновенным охлаждением получающегося аустенита без его рекристаллизации при высоких температурах.

Полученные результаты исследований показывают, что, изменяя скорость детали, можно регулировать состояние поверхностного слоя детали. Наибольший эффект наблюдается в том случае, когда увеличение скорости детали приводит к снижению контактной температуры.

Работниками отраслевой лаборатории № 3 Куйбышевского авиационного института совместно с работниками пром. предприятия и отраслевой лаборатории № 4 разработана конструкция композиционных кругов и технология их изготовления [3].

На рис. 5 представлена конструкция новых кругов, которая отличается от обычных тем, что рабочая часть круга состоит из режущей (1) и охлаждающе-смазывающей (2). У обычных кругов

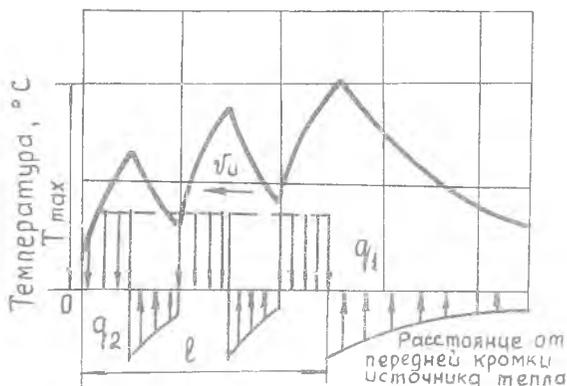


Р и с. 5. Конструкция композиционного круга:  
1 - режущая часть; 2 - смазывающе-охлаждающая часть

вся рабочая часть является режущей. Новая конструкция кругов позволяет уменьшать силы резания за счет подачи смазки в рабочую зону, увеличить отвод тепла в круг за счет высокой тепло-

проводности смазывающе-охлаждающих участков и уменьшить время действия теплового импульса.

На рис.6 показана схема действия тепловых источников и изменение контактной температуры при работе композиционными кругами.



Р и с.6. Схема действия тепловых источников и изменение контактной температуры

Из представленной схемы видно - при работе кругами новой конструкции тепловой источник состоит из отдельных тепловых импульсов, время действия которых зависит от скорости круга, количества и размеров режущих участков. При входе в рабочую зону охлаждающе-смазывающего сектора происходит отвод тепла из зоны резания и нанесение твердой смазки на обрабатываемую поверхность детали, что облегчает работу зерен и способствует снижению контактной температуры.

Количество тепловых импульсов за время действия теплового источника определяется по формуле

$$m = \frac{v_k}{\pi D_k} \tau_u z$$

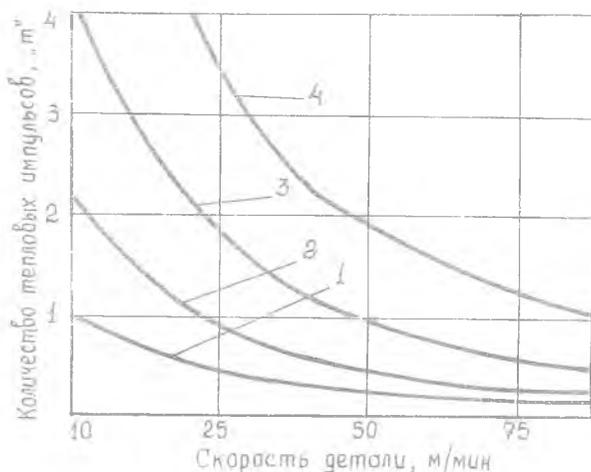
где  $\tau_u$  - время действия теплового источника;

$z$  - количество охлаждающе-смазывающих участков круга;

$D_k$  - диаметр круга.

На рис.7 показано влияние скорости движения детали на количество тепловых импульсов при работе кругами с различным коли-

чеством вставок. Режим шлифования:  $v_{кр} = 30$  м/с;  $t = 0,002$  мм/пр;  $S = 0,5$  м/мин. Из приведенных графиков видно, что количество тепловых импульсов за время действия теплового источника может изменяться в зависимости от скоростей круга, детали и числа вставок. При плоском шлифовании количество тепловых импульсов примерно на порядок выше, чем при круглом. Это объясняется тем, что время действия теплового источника при плоском



Р и с.7. Влияние скорости движения детали на количество тепловых импульсов; 1-4 соответственно  $z = 4, 8, 16, 32$

шлифовании значительно больше.

Расчеты показывают, что время действия теплового импульса при работе композиционными кругами можно уменьшить на несколько порядков.

Время охлаждения между тепловыми импульсами определяется по уравнению

$$\tau_0 = \frac{l_0}{v_{кр}}$$

где  $l_0$  - длина охлаждающего участка круга.

Время действия теплового импульса при работе композиционными кругами рассчитывается по формуле

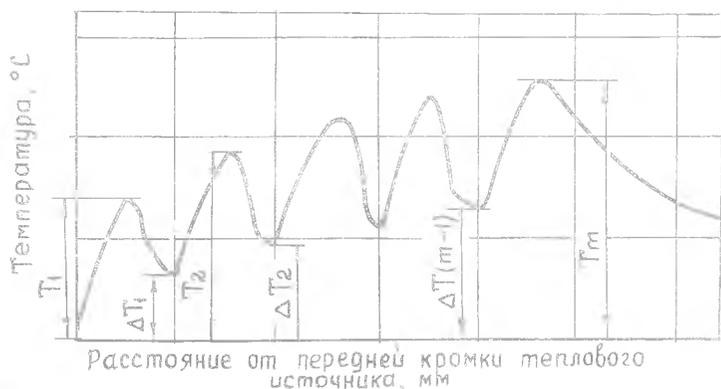
$$\tau_{m,u} = \frac{z_p}{v_{кр}}$$

где  $z_p$  - длина режущего участка круга.

Значение максимальной температуры при работе обычными кругами можно подсчитать по формуле

$$T_{max} = \frac{2\alpha\sqrt{T_u}}{\sqrt{\lambda C_p \delta}} \quad (I)$$

Характер изменения температуры поверхности детали при работе композиционными кругами показан на рис. 8, где



Р и с. 8. Изменение контактной температуры: I - 4 соответственно  $m=1, 2, 4, 5$

$T_1$  - максимальная температура в конце действия первого теплового импульса;  $\Delta T_1$  - температура поверхности детали в начале действия второго теплового импульса;  $T_m$  - максимальная температура в конце действия  $m$  - теплового импульса;  $\Delta T_{m-1}$  - температура поверхности в начале действия  $m$  - теплового импульса.

С целью изучения характера изменения температуры детали при входе охлаждающего участка круга в рабочую зону и определения значения остаточной температуры перед следующим тепловым импульсом воспользуемся решением проф. А.В. Дыкова [5] для двух полуограниченных стержней, которые имели разную начальную температуру и были приведены в соприкосновение.

Как показало решение этой задачи, на границе соприкосно-

вения тел температура устанавливается сразу после их соприкосновения и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена. Определяется она из выражения

$$\theta_{(0,\tau)} = \frac{K_3}{1 + K_3}, \quad (2)$$

где  $\theta_{(0,\tau)}$  - безразмерная температура, установившаяся при соприкосновении двух тел;

$K_3$  - критерий, характеризующий тепловую активность первого стержня относительно второго.

Применительно к нашим условиям

$$K_3 = \sqrt{\frac{\lambda_a \gamma_a c_{pa}}{\lambda_b \gamma_b c_{pb}}} = \frac{\lambda_a}{\lambda_b} \sqrt{\frac{a_b}{a_a}},$$

где  $\lambda_a, \gamma_a, c_{pa}$  - теплофизические параметры материала детали;  
 $\lambda_b, \gamma_b, c_{pb}$  - теплофизические параметры материала вставки.

Из полученных зависимостей видно - если тепловая активность материала детали и вставки одинакова, то относительная температура в стационарном состоянии

$$\theta_{(0,\tau)} = 0,5.$$

Если теплофизические свойства вставок выше теплофизических свойств обрабатываемого материала, то

$$\theta_{(0,\tau)} < 0,5.$$

В нашем случае  $\theta_{(0,\tau)} = \frac{\Delta T_{x-1}}{T_x}$  есть температура поверхности детали в рабочей зоне в начале следующего теплового импульса.

Расчеты остаточных температур по формуле (2) показывают, что при обработке титановых сплавов кругами с графитовыми вставками остаточная температура составляет 20...30%, а при обработке стали - 40...50% от максимальной. При шлифовании кругами со вставками из олова остаточная температура при обработке титана остается на уровне 30...35%, а при обработке сталей - 45...55%.

Полученные значения остаточной температуры несколько завышены по сравнению с действительной, так как в расчете не учитывалось снижение температуры в зоне контакта за счет распространения тепла вглубь детали. Интенсивность охлаждения будет несколько выше потому, что нагретые слои уходят из зоны контакта, а холодные вступают в контакт в результате непрерывного вращения круга.

Из проведенного анализа видно, что значение остаточной тем-

пературы составляет примерно одну и ту же часть от максимальной температуры предыдущего импульса.

На основании этого можно записать:

$$T_m = T_1 \frac{1 - a^m}{1 - a}$$

Подставив в выражение (I) значение  $T_1$ , получим формулу для определения максимальной контактной температуры при работе композиционными кругами:

$$T_m = \frac{2q \sqrt{T_m u}}{\sqrt{\pi c_p \gamma \lambda}} \frac{1 - a^m}{1 - a}, \quad (3)$$

где  $a = \frac{\Delta T_x - 1}{T_x}$  - коэффициент относительного снижения температуры.

Количество тепловых импульсов, при которых максимальная температура стремится к своему пределу, показано в табл. I.

Т а б л и ц а I

$a$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$m_c$	2	3	4	4	5	6	7	8

Из таблицы видно, что значение  $m_c$ , при которых имеет место стабилизация максимальной температуры, изменяется от 2 до 8.

Расчет геометрических параметров композиционных кругов необходимо производить в следующем порядке:

1. При известных теплофизических свойствах обрабатываемого материала и материала вставок определяется критерий, характеризующий тепловую активность материала детали относительно материала вставки:

$$K_3 = \sqrt{\frac{\lambda_a c_{p_a} \gamma_a}{\lambda_b c_{p_b} \gamma_b}}$$

2. Определяется относительная остаточная температура в рабочей зоне после входа в нее вставки круга.

3. При известном  $a$  по табл. 2 определяется количество тепловых импульсов -  $m_c$ , при котором температура шлифования имеет предельное значение.

4. Из выражения (3) определяется время действия теплового импульса. При этом принимаем, что максимальная температура шлифования должна быть меньше критической:

$$T_m \leq T_{кр} ,$$

тогда

$$\tau_{m.u} = \frac{0,785 T_{кр}^2 C_{pg} \gamma_g \lambda_g}{q^2} \frac{(1-a)^2}{(1-a^m)^2} .$$

5. Длина режущего участка круга рассчитывается по формуле

$$L_p = \tau_{m.u} v_{кр} .$$

6. Длина вставки по рабочей поверхности круга принимается в долях длины режущей части:

$$L_b = (1/4 - 1/2) L_p .$$

Рекомендуемые значения длины вставки приняты на основании изучения особенностей износа композиционных кругов.

7. При выбранном диаметре круга определяется количество вставок

$$z = \frac{\pi D_{кр}}{L_p + L_b} .$$

8. Рассчитывается фактическое количество тепловых импульсов для данного круга:

$$m = \frac{v_{кр}}{\pi D_k} \tau_u z .$$

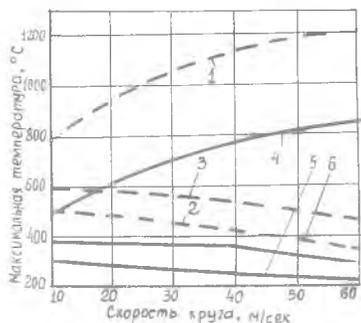
Если окажется, что число  $m$  значительно меньше  $m_c$ , то необходимо для данного  $m$  определить  $\tau_{m.u}$  и по нему рассчитать размеры элементов круга.

На рис.9 показано влияние скорости круга на характер изменения температуры шлифования при обработке титанового сплава ВТ9 кругами КЗ25СМ1К6 и конструкционной стали ЭИ643 кругами ЭБ25С1К6 обычной конструкции и со вставками. Режим шлифования:  $t = 0,02$  мм/пр;  $v_g = 10$  м/мин;  $S_{np} = 2$  м/мин;  $D_{кр} = 250$  мм.

Применение композиционных кругов для обработки указанных материалов позволяет значительно снизить контактную температуру. Если при работе обычными кругами с увеличением скорости резания температура увеличивается, то при работе композиционными кругами значение ее уменьшается. в результате уменьшения времени действия теплового импульса и более интенсивного отвода тепла с рабочей зоны охлаждающими вставками. Чем выше тепловая активность материала вставок, тем интенсивнее снижается температура шлифования.

Изучение работы кругов новой конструкции показало, что их режущие свойства, интенсивность износа и прочность в значительной степени зависят от количества и вида связывающего вещества в смазывающе-охлаждающих вставках.

Полученные результаты показывают, что в качестве связывающего вещества можно применять феноло-формальдегидные смолы.



Р и с. 9. Влияние скорости круга на контактную температуру; 1, 2, 3 - соответственно кругу: обычный, композиционный ( $\alpha = 0$ ), композиционный ( $\alpha = 0,4$ ) (обрабатываемый материал ВТ9); 4, 5, 6 - соответственно кругу: обычный, композиционный ( $\alpha = 0$ ), композиционный ( $\alpha = 0,4$ ) (обрабатываемый материал ЭИ643)

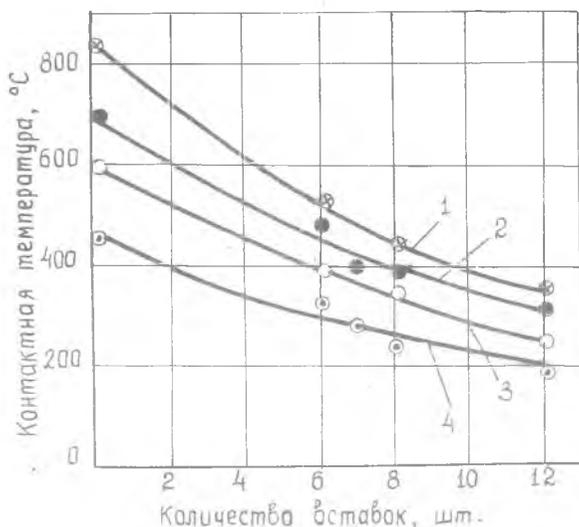
уменьшению интенсивности наложения титана на рабочую поверхность круга.

На рис. 10 показано влияние количества вставок на характер изменения контактной температуры при обработке сплава ВТ9. В опытах использовались круги К325СМІК7 с графитовыми вставками. Был принят такой же режим шлифования, как в предыдущей серии. Из графиков видно, что с увеличением количества вставок контактная температура снижается, что объясняется уменьшением времени действия теплового импульса. С уменьшением глубины шлифования снижается влияние длины режущей части на контактную температуру что свидетельствует о повышении эффективности применения композиционных кругов с увеличением глубины шлифования. Полученные зависимости подтверждают возможность значительного снижения кон-

Для нормальной работы кругов количество их в материале вставки должно составлять от 10 до 30%. Для кругов с большей твердостью необходимо брать 20-30% связывающего вещества, для более мягких - 10-20%. Следует отметить, что наличие вставок приводит к более равномерному износу круга и сохранению его геометрической точности.

Повышение стойкости кругов со вставками при обработке титановых сплавов объясняется снижением термодинамической напряженности процесса при их работе. Подача твердой смазки в рабочую зону и снижение контактной температуры приводит к

тактной температуры за счет увеличения количества вставок и повышения их теплофизических свойств.



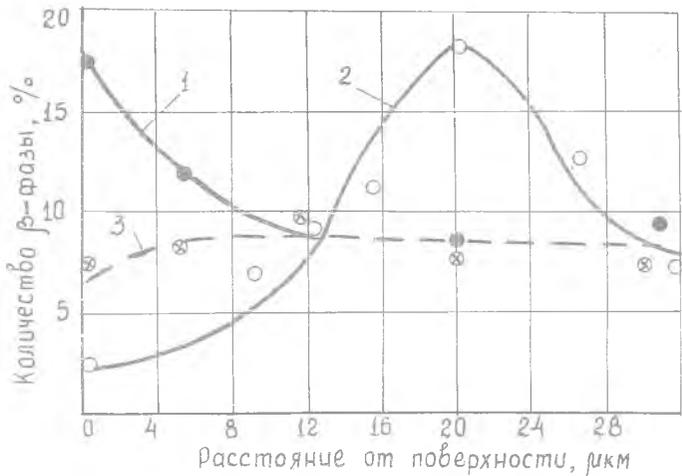
Р и с.10. Влияние количества вставок на контактную температуру: 1 - 4 соответственно  $t = 0,2; 0,015; 0,01; 0,005$  мм/пр

Сопоставление температур, полученных экспериментальным и теоретическим методами, показывает, что расчетные температуры по своей величине весьма близки к температурам, полученным в опытах. Разница в значении расчетных и экспериментальных температур не превышает 8 - 12%, что допустимо. При этом температуры, полученные экспериментальным методом, несколько выше расчетных.

На рис.11 показано влияние количества вставок на характер и величину остаточных напряжений при обработке сплава ВТ9. Режим обработки:  $v_c = 1,5$  м/мин;  $t = 0,015$  мм/ход. ( $v_k = 25$  м/с). Из графиков видно, что применение композиционных кругов при обработке титановых сплавов позволяет значительно уменьшить растягивающие остаточные напряжения. Если при работе обычным кругом значение максимальных остаточных напряжений составляет  $32 \text{ кгс/мм}^2$ , то при работе композиционными кругами  $\sigma = 8$ ,  $\epsilon = 4 \text{ кгс/мм}^2$ , а



Р и с. 11. Влияния количества вставок на тангенциальные остаточные напряжения: 1 -  $z = 0$ ; 2 -  $z = 4$ ; 3 -  $z = 8$ ; 4 -  $z = 10$



Р и с. 12. Изменение фазового состава: 1 -  $t = 0,01$  ( $z = 0$ ); 2 -  $t = 0,02$  ( $z = 0$ ); 3 -  $t = 0,02$  ( $z = 8$ )

при  $\alpha = 10$  образуются незначительные сжимающие напряжения. Основным фактором, способствующим образованию растягивающих остаточных напряжений, является тепловой. Уменьшению объема поверхностных слоев детали в процессе их обработки способствуют пластические деформации, являющиеся результатом неоднородного нагрева металла, фазовые и структурные изменения, вызванные высокими температурами нагрева.

На рис. 12 показан характер влияния количества вставок и глубины шлифования на изменение фазового состава в поверхностном слое детали при обработке титанового сплава BT9. Режим шлифования:

$$V_{кр} = 25 \text{ м/с}; \quad V_d = 1,5 \text{ м/мин.}$$

При работе обычными кругами на указанном режиме резания в поверхностном слое детали имеют место прижоги, характеризующиеся уменьшением  $\beta$  - фазы на глубине до 10 мкм и увеличением ее на глубине от 13 до 28 мкм. Образование такого вида прижогов свидетельствует о высоких температурах нагрева поверхностных слоев при работе с  $t = 0,02$  мм/пр. Уменьшение глубины шлифования до  $t = 0,01$  мм/пр при работе обычными кругами приводит к увеличению  $\beta$  - фазы в поверхностных слоях детали до 17%.

При работе композиционными кругами с  $\alpha = 8$  фазовые превращения в поверхностном слое не происходят. Объясняется это тем, что при работе кругами новой конструкции контактная температура значительно ниже, чем при работе обычными кругами.

Исследования качества обработанной поверхности показали, что применение композиционных кругов позволяет значительно улучшить состояние поверхностного слоя ( по сравнению с поверхностью, обработанной обычными кругами) и обеспечить бесприжоговую обработку деталей.

## Л и т е р а т у р а

1. У р ы в с к и й Ф.П., Г р у с о в В.Н., К о п ы т и н Ю.А. Установка для моделирования быстротекучих тепловых процессов. Межвуз. сб.: "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". КуАИ, 1978, вып. 5.

2. Б а г а р я ц к и й Ю.А. Рентгенография в физическом металлведении. М., "Наука", 1961, с. 57-64.

3. "Исследование качества обработанной поверхности и изыскание резервов повышения производительности при шлифовании деталей из титановых и жаропрочных сплавов и высокопрочных сталей". Технич. отчет по теме № 153-3, КуАИ, 1977.

4. У р ы в с к и й Ф.П., С и н я е в Г.М. и др. Аналитическое определение температур на цилиндрической поверхности при одновременном шлифовании торцев борта и роликовой дорожки колец подшипников. „Подшипниковая промышленность.“ ВНИИПП, 1976, № II, с. 6-13.

5. Л и к о в А.В. Теория теплопроводности. М., "Высшая школа", 1967, с. 365-369.

УДК 621.923.04

Ф.П. Урывский, Е.М. Маркушин,  
Г.П. Баландин

#### К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ИЗДЕЛИИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГОМ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ ВСТАВКАМИ

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования конструкционных материалов, оказывают решающее воздействие на эксплуатационные свойства подповерхностных слоев обработанной детали.

Расчету температурных полей в обрабатываемой шлифованием детали посвящен ряд работ [1]-[3] и др. В этих исследованиях тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования, изучаются на основе фундаментального решения уравнения теплопроводности.

Однако при таком подходе к решению рассматриваемой задачи не учитывается влияние охлаждения вне зоны контакта шлифовального круга на распределение температуры подповерхностных слоев обрабатываемого изделия.

В данной работе предложен метод расчета температурных полей при шлифовании кругом со специальными вставками, учитывающий конвективный теплообмен вне зоны контакта круга с изделием.

Пусть справедливы предположения, приведенные в работе [4]. Тогда решение рассматриваемой задачи приводит к интегрированию уравнения

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (1)$$

с граничным условием