

Ф.П.Уривский

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

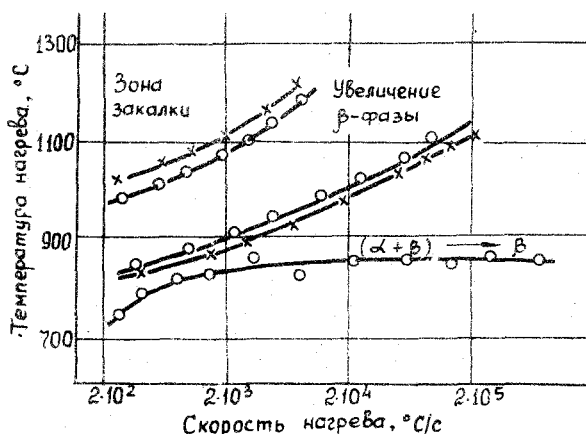
Многочисленные исследования показывают, что доминирующим фактором в формировании свойств поверхностных слоев деталей является тепловой. При определенных температурах шлифования в поверхностных слоях деталей происходят фазовые и структурные изменения, перераспределение легирующих элементов, изменения параметров тонкой структуры, образование значительных растягивающих напряжений.

Результаты наших исследований показали, что при шлифовании титановых сплавов BT3-1, BT9, BT20 и высокопрочных сталей 30XГСНА, ЭИ643, ЭИ347 значение температур, соответствующих структурной устойчивости указанных материалов, характер и интенсивность фазовых и структурных изменений не остаются постоянными, а зависят от параметров термического цикла. Влияние температурно-скоростного фактора на температуру вторичного отпуска и закалки при шлифовании стали ШХ15 было установлено в исследованиях [1]. Для изучения закономерностей формирования поверхностного слоя и разработки теории управления его состоянием необходимо знать влияние параметров термического цикла шлифования на температуру, соответствующую структурной устойчивости обрабатываемого материала.

Изучение влияния указанных параметров в отдельности на значение критических температур и глубину залегания слоев с измененной структурой непосредственно при шлифовании представляет значительные трудности. Требуемое значение параметров термического цикла мы можем получить за счет режима шлифования. Однако, изменяя один из режимов шлифования, мы одновременно изменяем несколько параметров термического цикла. Поэтому было принято изучать влияние отдельных параметров термического цикла на значение критических температур и характер фазовых и структурных изменений на специальной высокоскоростной установке, позволяющей моделировать термические режимы шлифования [2]. Указанная установка изготовлена по типу установки ИМЭТ-1 [3]. Нагрев образцов в этой установке производится способом электросопротивления. Температуры, при которых происходит

ли фазовые и структурные изменения в металле, определялись по осциллограммам, описывающим характер удлинения образцов, изменение температуры во времени и на основании изучения микрошлифов нагреваемых образцов.

Исследования проводились на титановых сплавах ВТЗ-І, ВТ9, ВТ22, ВТ20 и сталях ЭИ347 и ЭИ643. Образцы изготавливались из соответствующего материала одной плавки. Скорости нагрева изменялись от  $\omega_n = 2 \cdot 10^2$  до  $2 \cdot 10^5$  °С/с. Скорости охлаждения до  $1,8 \cdot 10^4$  °С/с. Влияние скорости нагрева на характер структурных изменений в титановом сплаве ВТ9 после отжига и в титановом сплаве ВТЗ-І после упрочняющей термической обработки показано на рис. 1. Скорость охлажде-



Р и с. 1. Влияние температуры и скорости нагрева на характер структурных изменений: —х— ВТ9; —о— ВТЗ-І

ния образцов была  $\omega_n = 2 \cdot 10^3$  °С/с...  $25 \cdot 10^3$  °С/с. Из полученных данных видно, что с увеличением скорости нагрева как температура фазового перехода  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ , так и температура закалки возрастают. Температура перехода  $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$  повышается при увеличении скоростей нагрева от  $2 \cdot 10^2$  до  $3 \cdot 10^5$  °С/с. При скоростях нагрева  $\omega_n = 2 \cdot 10^3$  °С/с -  $2 \cdot 10^5$  °С/с, характерных для шлифования, температура перехода  $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$  для титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-І составляет 850 - 1100 °С. С увеличением скорости нагрева от  $2 \cdot 10^2$  °С/с до  $8 \cdot 10^3$  °С/с температура закалки повышается с 950 до 1200 °С.

Влияние скорости нагрева на температуру отпуска для высокопрочных сталей ЭИ643 и ЭИ347 показано на рис. 2. С увеличением скорости нагрева в указанном диапазоне температура отпуска для стали ЭИ643 повышается от  $310^{\circ}\text{C}$  до  $490^{\circ}\text{C}$ , а для стали ЭИ347—от  $530$  до  $650^{\circ}\text{C}$ . Тенденция к стабилизации температуры отпуска у сталей наблюдается при скоростях нагрева свыше  $2 \cdot 10^3 \text{C}/\text{с}$ . Температура вторичной закалки для сталей ЭИ643 и ЭИ347 с увеличением скорости нагрева вначале снижается, а при скоростях  $\omega_n = 6 \cdot 10^3 \text{C}/\text{с}$  остается примерно постоянной.



Р и с. 2. Влияние температуры и скорости нагрева на характер структурных изменений: —  $\circ$  — ЭИ347; —  $\square$  — ЭИ643

Увеличение скорости охлаждения приводит к снижению температуры, соответствующей началу перехода  $(\alpha + \beta) \rightarrow \alpha' + \beta$ , и температуры вторичной закалки

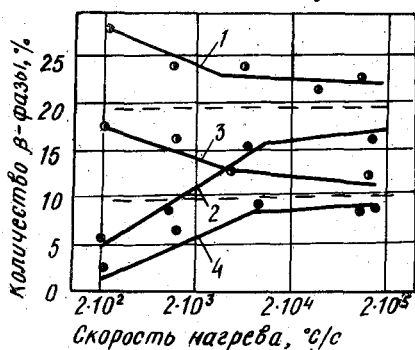
для сталей. Если для высокопрочной стали ЭИ643 увеличение скорости охлаждения от  $2 \cdot 10^2$  до  $2 \cdot 10^4 \text{C}/\text{с}$  приводит к снижению температуры вторичной закалки примерно на  $150^{\circ}\text{C}$ , то для титановых сплавов увеличение скорости охлаждения в указанном диапазоне приводит к снижению температуры закалки примерно на  $100^{\circ}\text{C}$ . Приведенные результаты исследования дают основание сделать вывод, что при одних и тех же температурах нагрева, но различных скоростях нагрева и охлаждения в титановых сплавах и сталях могут происходить различные по характеру структурные изменения. Это свидетельствует о том, что знание одной температуры нагрева недостаточно для того, чтобы судить о тех процессах, которые происходят в титановых сплавах и высокопрочных сталях при шлифовании.

Проведенные опыты при нагреве титанового сплава ВТ9 до  $1000^{\circ}\text{C}/\text{с}$  со скоростью  $\omega_n = 3 \cdot 10^5 \text{C}/\text{с}$  и высокопрочной стали ЭИ347 до  $650^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $2,3 \cdot 10^5 \text{C}/\text{с}$  показали, что изменение фазового состава в образцах не происходит.

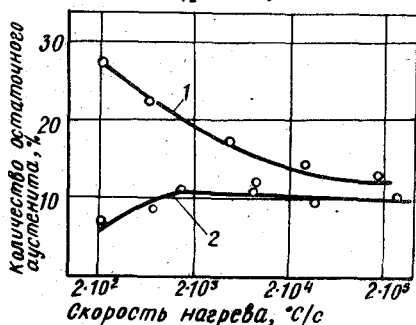
Исследование фазового состава и измерение микротвердости образцов показало, что увеличение скоростных параметров термического цикла приводит к снижению интенсивности процессов, происходящих в

титановых сплавах и высокопрочных сталях при нагреве. Влияние скорости нагрева на изменение фазового состава титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ9 приведено на рис. 3. Опыты проводились при нагреве образцов до постоянных температур  $T = 850^{\circ}\text{C}$  и  $T = 1150^{\circ}\text{C}$ . Скорость охлаждения была  $2,3 \cdot 10^3 \text{C}/\text{с}$ . Из приведенных данных видно, что с увеличением скорости нагрева при температурах, ниже  $T_{\text{кр}}$ , количество  $\beta$ -фазы в титановых сплавах уменьшается и стремится к фазовому составу исходного материала.

Увеличение же скорости нагрева при температурах  $T \leq 1150^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению количества  $\beta$ -фазы. Подобные результаты были получены при изучении влияния скорости нагрева на изменение количества остаточного аустенита в стали ЭИ643 (рис. 4). Опыты



Р и с. 3. Комплексное влияние скорости и температуры нагрева на фазовый состав титановых сплавов: 1, 2 - ВТЗ-1; 3, 4 - ВТ9;  $\circ$  -  $T = 850^{\circ}\text{C}$ ;  $\bullet$  -  $T = 1150^{\circ}\text{C}$



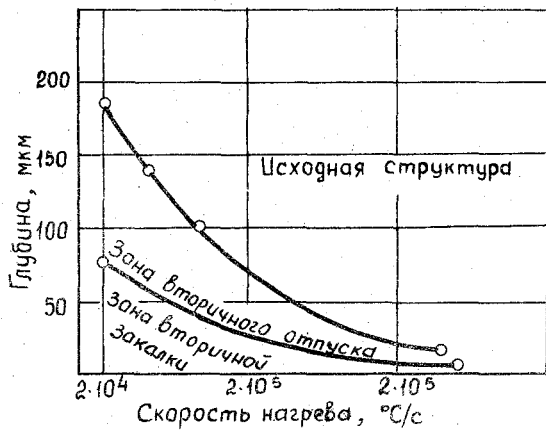
Р и с. 4. Влияние скорости нагрева на количество остаточного аустенита в стали ЭИ643: 1, 2 - соответственно  $T_{\text{н}} = 900, 700^{\circ}\text{C}$

проводились при нагреве образцов до  $900^{\circ}\text{C}$  и  $750^{\circ}\text{C}$ . Из приведенных данных видно, что увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению остаточного аустенита. При скоростях нагрева  $\omega_{\text{н}} = 2 \cdot 10^5 \text{C}/\text{с}$  количество остаточного аустенита мало изменяется и находится в допустимых пределах, которые устанавливаются при термической обработке. При нагреве до температуры  $T = 750^{\circ}$ , близкой к точке  $A_{\text{C}1}$ , распад остаточного аустенита имеет место только при скоростях нагрева менее  $7 \cdot 10^2 \text{C}/\text{с}$ . При более высоких скоростях нагрева количество остаточного аустенита остается постоянным. По-видимому, при высоких скоростях нагрева распад остаточного аустенита происходит при более высоких температурах.

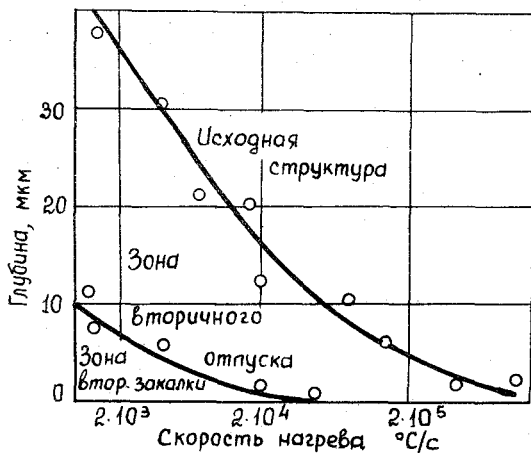
Из полученных данных видно, что увеличение скоростных параметров термического цикла приводит к снижению интенсивности процессов, происходящих в металлах под воздействием теплового фактора. Последнее подтверждают результаты исследования изменения микронапряжений и блоков когерентного рассеивания. В опытах нагрев титановых образцов производился до температуры  $T = 1000^{\circ}\text{C}$ , а стальных  $T = 800^{\circ}\text{C}$ . Увеличение скорости нагрева в указанном диапазоне приводит к снижению размеров блоков когерентного рассеивания для титанового сплава ВТЗ-1 от  $535 \text{ \AA}$  до  $380 \text{ \AA}$  и к уменьшению микронапряжений от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ , а для высокопрочной стали ЭИ643 соответственно от  $830 \text{ \AA}$  до  $400 \text{ \AA}$  и микронапряжений от  $5,4 \cdot 10^{-3}$  до  $1,7 \cdot 10^{-3}$ . В исходном состоянии характеристики тонкой структуры у титанового сплава ВТЗ-1 были;  $D = 390$ ,  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ , у стали ЭИ643, соответственно,  $500 \text{ \AA}$  и  $1,9 \cdot 10^{-3}$ .

Из приведенных данных видно, что с увеличением скоростей нагрева и охлаждения влияние теплового фактора на параметры тонкой структуры также снижается. При нагреве титанового сплава ВТЗ-1 и высокопрочной стали ЭИ643 со скоростями  $\omega_n = 2,4 \cdot 10^{-40} \text{ C/c}$  и  $\omega_n = 1,8 \cdot 10^{-30} \text{ C/c}$  характеристики тонкой структуры мало отличаются от параметров тонкой структуры исходного материала.

Температурно-скоростные параметры оказывают значительное влияние не только на характер структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях деталей, но и на глубину их залегания. На рис. 5 показано влияние скорости нагрева на глубину вторично закаленного и отпущенного слоев для титанового сплава ВТ9 и высокопрочной стали ЭИ643. Температура нагрева была принята постоянной: для титанового сплава  $T_n = 1250^{\circ}\text{C}$ , для стали  $T_n = 900^{\circ}\text{C}$ . Из приведенных данных видно, что с увеличением скорости нагрева глубина залегания вторично закаленного и отпущенного слоев, а также их толщина уменьшаются. Для титанового сплава ВТ9 увеличение скорости нагрева от  $2 \cdot 10^{30} \text{ C/c}$  до  $2 \cdot 10^{50} \text{ C/c}$  приводит к уменьшению глубины залегания отпущенного слоя в 14 раз, а его толщины - примерно в 20 раз. Несмотря на то, что температура нагрева для титанового сплава была значительно выше, чем для стали, глубина залегания слоя с измененной структурой значительно больше у стали ЭИ643, чем у титанового сплава ВТЗ. Это можно объяснить тем, что титановый сплав ВТ9 по сравнению с высокопрочной сталью ЭИ643 имеет значительно выше температуры нагрева, фазовых превращений и меньший коэффициент теплопроводности.



а



Р и с. 5. Изменение глубины вторичного отпуска и закалки в зависимости от скорости нагрева: а - ВМ643; б - ВТ9

При скоростях нагрева  $\omega_n = 2 \cdot 10^{40} \text{C/c}$  для титанового сплава и  $\omega_n = 2 \cdot 10^{60} \text{C/c}$  для стали толщина вторично закаленного слоя близка к нулю и составляет доли микрона.

Глубина газонасыщенного слоя определялась методом изучения микроструктуры и измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 гс. Результаты исследования показали, что газонасыщение поверхностного слоя может носить как фронтальный характер, так и избирательный. Первый случай имеет место при нагреве титановых сплавов BT20, BT3-I, BT9, второй случай - при нагреве сплава BT22, имеющего крупнозернистую структуру.

Увеличение скорости нагрева от  $2 \cdot 10$  до  $3 \cdot 10^{40} \text{C/c}$  приводит к повышению температуры начала газонасыщения от  $600 - 800^\circ\text{C}$  до  $1200 - 1300^\circ\text{C}$ . Малолегированный титановый сплав BT20 имеет наибольшую склонность к взаимодействию с газами. С увеличением легирующих элементов в сплаве температура начала газонасыщения повышается. При скоростях нагрева выше  $10^{40} \text{C/c}$  температура, соответствующая началу газонасыщения, резко повышается. Значительное снижение глубины проникновения газов можно получить за счет увеличения скорости нагрева. Наибольшая глубина проникновения газов имеет место у титанового сплава BT22, наименьшая у жаропрочного титанового сплава BT9.

Глубина проникновения газов у титанового сплава BT22 примерно в 2 раза больше, чем у BT9. Полученную закономерность можно объяснить тем, что высоколегированный сплав BT22 имеет более крупные зерна, между которыми газ проникает легко. Интенсивное насыщение газами титановых сплавов наблюдается при температурах полиморфного превращения  $(\alpha + \beta) \rightleftharpoons \beta$ , т.е. когда кристаллическая решетка разрушена, в ней ослаблены межатомные связи, что приводит к повышению подвижности атомов.

Результаты проведенных исследований показывают, что на формирование свойств поверхностного слоя оказывает влияние не только температура шлифования, но и другие параметры термического цикла. Из полученных закономерностей следует, что решение проблемы бесприжогового шлифования должно идти не только за счет уменьшения мощности теплового потока в деталь, но и за счет увеличения температурно-скоростных параметров термического цикла шлифования.

## Л и т е р а т у р а

1. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. - Саратов: СГУ, 1975.
2. Урывский Ф.П., Трусов В.Н., Копытин Ю.А. Установка для моделирования быстротекущих тепловых процессов. - В сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Вып. 5. - Куйбышев: КуАИ, 1978.
3. Шоршоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. - М.: Наука, 1972.

УДК 621.923.1:621.922.34

В.И.Стебихов, Л.А.Сухинина

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ТОРЦЕМ КРУГА

Силы, возникающие при плоском шлифовании твердых сплавов торцем алмазного круга, измерялись с помощью динамометра УДМ-1 конструкции ВНИИ с записью сигналов на фотобумагу с помощью осциллографа Н700. Измерялись две составляющие: тангенциальная ( $P_x$ ) и нормальная к обрабатываемой поверхности ( $P_y$ ). Сила подачи  $P_z$  составляет 8-10% от силы  $P_y$  ( $P_y=25...80$  Н) и практического значения не имеет.

Как показали исследования, изменение зернистости в пределах АСМ40-АСО16 не оказывает существенного влияния на изменение сил резания. Увеличение концентрации алмазов в круге приводит к уменьшению сил резания. Особенно значительно влияние концентрации и связки при  $S_{\text{поп}} \geq 0,010$  мм/дв.х. Наименьшие силы резания возникают при шлифовании кругами на связках Б1, Б3, Б4 [1].

При увеличении поперечной и продольной подачи силы резания возрастают, в большей мере с увеличением поперечной подачи. Например, при увеличении поперечной подачи в 4 раза силы резания возрастают примерно в 3,7 раза, а при увеличении продольной подачи в такое же число раз - только в 2,4 раза. Это объясняется тем, что с увеличением поперечной подачи увеличивается не только поперечное сечение стружки, но возрастает и площадь контакта связки-наполнителя с обрабатываемой поверхностью.