

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТОНКУЮ КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

© 2009 Н.Д. Папшева, М.К. Александров, О.М. Акушская

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 16.11.2009

Приведены результаты исследования влияния параметров ультразвукового упрочнения на микроискажения, плотность дислокаций и структурные превращения в титановых сплавах и быстрорежущих сталях.

Ключевые слова: ультразвук, упрочнение, микроискажения, плотность дислокаций, структурно-фазовые превращения

Процесс поверхностного пластического деформирования оказывает существенное влияние на основные показатели качества поверхностного слоя, поэтому установление связи между структурными факторами, основными показателями качества поверхности и параметрами процесса упрочнения дает возможность назначения оптимальных режимов обработки. Исследование структурных изменений проводилось по интегральным ширинам B , которые определялись по формуле:

$$B' = \frac{S}{I_m},$$

где S – площадь между дифракционной кривой и линией фона, измеренная планиметрированием; I_m – интенсивность в максимуме дифракционной кривой.

Разделение вкладов в уширение интерференционных линий за счет конечных размеров блоков мозаики и микроискажений кристаллической решетки обычно проводится по двум линиям соответствующим первому и второму порядку отражения от какой-либо плоскости [1]. Однако для титановых сплавов получить два порядка отражения невозможно. Поэтому использовались линии (0111) и (0113) α -фазы, на уширение которых вводилась поправка вследствие анизотропии упругих свойств. В предположении, что уширение рентгеновских интерференционных линий описывается функциями, после несложных преобразований получим следующие выражения для определения размеров блоков D и микроискажений $\Delta d/d$:

$$D = \frac{10^{-4}}{6,10\beta_{0111} - 3,75\beta_{0113}} \text{ см},$$
$$\frac{\Delta d}{d} = (3,58\beta_{0113} - 4,89\beta_{0111}) \cdot 10^{-4}$$

Плотность дислокаций определялась по формуле $N_D = 3/D^2$.

Изучение особенностей влияния ультразвукового упрочнения и обкатки шариком на тонкую кристаллическую структуру титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ОТ4 проводилось на образцах после точения, шлифования, а также в отожженном состоянии ($T_1=950^\circ\text{C}$, 1 час, $T_2=560^\circ\text{C}$, 6 часов – сплав ВТ9, $T_1=680^\circ\text{C}$, 2 часа, $T_1=870^\circ\text{C}$, 2 часа, $T_2=650^\circ\text{C}$, 2 часа – сплав ВТ3-1, во всех случаях охлаждение на воздухе). Закаленные быстрорежущие стали исследовали после шлифования. Исследования показали, что ультразвуковое упрочнение и обкатка шариком вызывают дополнительное уширение рентгеновских интерференционных линий после всех видов обработки (рис. 1). При этом увеличение деформационного упрочнения, определяемое относительным уширением рентгеновских линий на отожженных образцах (кривая 1), происходит более интенсивно, чем при упрочнении после точения, однако степень деформационного упрочнения во втором случае выше. На это, в частности, указывает тот факт, что уровень размытия рентгеновских интерференционных линий в образцах, упрочненных после отжига ниже, чем в упрочненных после точения. Это связано с тем, что при упрочнении образцов после точения реализуется субструктурное состояние с более мелкими блоками и большими микроискажениями кристаллической решетки.

Папшева Нина Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: isap@samgtu.ru

Александров Михаил Кузьмич, кандидат технических наук, доцент

Акушская Ольга Мордуховна, старший преподаватель. E-mail: Olgaaku@gmail.com

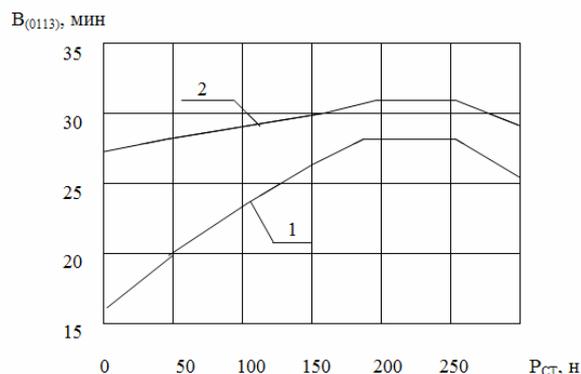


Рис. 1. Влияние статического усилия на уширение линий β 0113 при УЗУ.

Титан ВТЗ-1, ξ 15 мкм, $V=30$ м/мин., $d_{ш}=5$ мм, $S=0,07$ мм/об., $f=30$ кГц. 1 – отжиг, 2 – точение.

Известно, что прохождение ультразвуковых волн через кристалл вызывает активацию дислокаций [2]. При пластическом деформировании в ультразвуковом поле часть активированных дислокаций становится подвижной, что вызывает локализованную пластическую деформацию. В предварительно точеных образцах доля подвижных дислокаций меньше вследствие большого количества препятствий. Это вызывает своеобразное субструктурное упрочнение за счет более мелких блоков с наибольшими микроискажениями внутри них. При упрочнении отожженных образцов движение активизированных ультразвуком дислокаций не тормозится препятствиями, в связи с чем длина их свободного пробега больше и, следовательно, степень упрочнения ниже. Анализ распределения уширений линий по глубине показал, что в отожженных образцах наиболее интенсивное деформационное упрочнение после ультразвуковой обработки распространяется до глубины 150-200 мкм, а в точеных до 80-100 мкм.

Проведенные исследования позволили установить, что поверхностное пластическое деформирование титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9 и ОТ4 сопровождается дроблением блоков мозаики, значительным развитием микроискажений и увеличением плотности дислокаций. Причем обкатка шариком, как показали исследования образцов упрочненных в отожженном состоянии, отличается более сильными дроблением блоков мозаики по сравнению с ультразвуковым упрочнением ($2,0 \cdot 10^{-6}$ против $3,1 \cdot 10^{-6}$), а также более интенсивными микроискажениями ($4,6 \cdot 10^{-4}$ против $6,1 \cdot 10^{-4}$), достигающими глубины 250-300 мкм (сплав ВТ9). Обкатка шариком характеризуется также более высокой плотностью дислокаций $N=7,5 \cdot 10^{-11}$.

Увеличение размеров блоков, а также уменьшение микроискажений и плотности дислокаций при ультразвуковом упрочнении связано с поглощением акустической энергии в местах элементарных пластических сдвигов, что приводит к локальному нагреву, снятию напряжений, разблокировке дислокаций, увеличению их подвижности. Все эти факторы, характеризующие в общем разупрочняющее действие ультразвука, способствуют также более равномерной пластической деформации в процессе упрочнения. Эффект разупрочнения подтверждается измерением микротвердости поверхностного слоя ВТ9. Результаты этих исследований показали, что степень деформационного упрочнения при ультразвуковой обработке примерно на 10% меньше, чем при обкатке шариком, хотя остаточные напряжения имеют близкие значения $\sigma_{\tau}=450$ МПа.

Количественное определение содержания β -фазы в титановых сплавах ВТ9 и ВТЗ-1 производили по интегральным интенсивностям линий (0112) α -фазы и (200) β -фазы по формуле [1]

$$C_{\beta} = \frac{100}{1 + 2,33 \frac{I_{\alpha}}{I_{\beta}}}$$

При исследовании сплавов с малым содержанием β -фазы (ОТ4) использовали методу анализа отношения интегральной интенсивности $(\overline{0111})\alpha$ -фазы к суммарной интенсивности линий (0002) α -фазы и (110) β -фазы, которые накладываются друг на друга

$$\frac{I_{(0111)\alpha}}{I_{(0002)\alpha+(110)\beta}}$$

При нахождении интегральных интенсивностей линий предварительно производилось определение максимума линий $(\overline{0111})\alpha$ -фазы и (110) β -фазы. Наблюдаемое различие в интегральных интенсивностях анализируемых линий после ультразвукового упрочнения вызвано изменением фазового состава в поверхностных слоях. Таким образом, по приведенному отношению можно качественно судить о фазовых превращениях в титановых сплавах, содержащих небольшое количество β -фазы.

Исследование влияния ультразвукового упрочнения и обкатки шариком на фазовый состав поверхностного слоя титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ОТ4 показало, что наибольшие

фазовые превращения при упрочнении происходят в отожженных образцах. Так, при ультразвуковом упрочнении и обкатке шариком образцов из сплава ВТЗ-1 в отожженном состоянии содержание β -фазы на поверхности уменьшилось с 20% до 12% и глубина фазовых превращений при этом составляла 100-150 мкм. При упрочнении точеных образцов количество β -фазы уменьшилось с 10% до 4-5% (рис. 2).

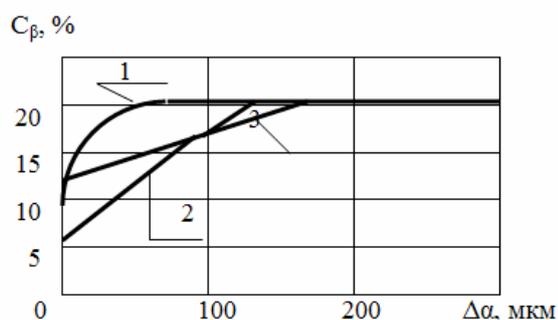


Рис. 2. Распределение β -фазы по глубине.

Сплав ВТЗ-1, $P_{ст.}$ 200 н, $\xi=15$ мкм, $V=30$ м/мин., $d_{ш}=5$ мм, $S=0,07$ мм/об., $f=20$ кГц. 1 – после точения, 2 – после точения и ультразвукового упрочнения, 3 – после отжига и ультразвукового упрочнения

Сплав ВТ9 в отожженном состоянии содержал 17% β -фазы, в результате обкатки шариком и ультразвукового упрочнения количество β -фазы на поверхности уменьшилось до 8-9% и фазовые превращения наблюдались до глубины 100 мкм. Анализ интегральных интенсивностей линий α и β -фаз отожженного сплава ОТ4 показывает, что обкатка шариком и ультразвуковое упрочнение сопровождается $\beta \rightarrow \alpha$ превращениями. Исследования показали, что основной причиной $\beta \rightarrow \alpha$ превращений при ультразвуковом упрочнении и обкатке шариком является силовой фактор, это относится и к другим видам механической обработки.

Распад метастабильной β -фазы под воздействием пластической деформации приводит к изменению характера эпюр остаточных напряжений, что объясняется различной плотностью фаз, так $d_{\alpha}=4,506-4,54$ г/см², d_{β} 1,35-4,47 г/см². Поскольку плотность β -фазы меньше плотности α -фазы, $\beta \rightarrow \alpha$ превращения, вследствие уменьшения объема в поверхностном слое, должны способствовать смещению эпюры остаточных напряжений в сторону положительного знака. У сплава ОТ4 величина тангенциальных и осевых сжимающих остаточных напряжений на 100-150 мПа выше, чем у сплавов ВТЗ-1, ВТ9, а количество свободной β -фазы в исходном состоянии не

превышает 4-5%. На рис. 3 показана зависимость $\beta \rightarrow \alpha$ превращений в сплаве ОТ4 от величины статического усилия при ультразвуковом упрочнении. Уменьшение фазовых превращений при $P_{ст.}=250-300$ Н, по-видимому, связано с явлением перенаклепа.

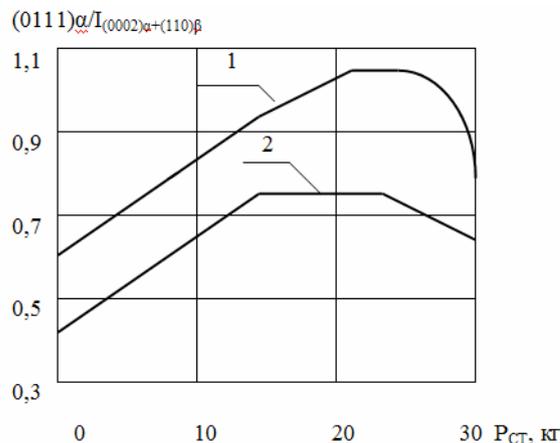


Рис. 3. Влияние статического усилия на $\beta \rightarrow \alpha$ превращение при ультразвуковом упрочнении образцов.

1 – после точения, 2 – после отжига. Сплав ОТ4; $\xi=15$ мкм, $V=30$ м/мин., $d_{ш}=5$ мм, $S=0,07$ мм/об., $f=20$ кГц

Обкатка шариком быстрорежущей стали Р6М5 также приводит к дроблению блоков мозаики и увеличению плотности дислокаций с максимум на глубине 80 мкм и значительному развитию микроискажений на глубине до 200 мкм. При этом микроискажения растут с повышением усилия обкатки. Обкатка шариком сопровождается выделением мелкодисперстных карбидов, что подтверждается результатами металлографического и электронномикроскопического анализов. С увеличением усилия повышается их дисперсность и равномерность распределения в поверхностном слое, что должно повысить стойкость режущего инструмента.

При шлифовании закаленной стали Р6М5 вследствие высоких температур происходят структурные превращения, в результате которых в поверхностном слое повышается содержание аустенита до 26%. Обкатка шариком сопровождается частичным распадом аустенита (до 15%) и переходом в более износостойкую структуру мартенсита. Высокая твердость мартенсита обусловлена измельчением α -фазы в результате сдвинутого $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Кроме того, карбиды, выделившиеся при упрочнении, очевидно, служат механическим препятствием для возникновения крупных кристаллов мартенсита. Поэтому кристаллы «мартенсита деформации» мельче

кристаллов мартенсита закалки недеформированной стали, что также существенно увеличивает износостойкость. При ультразвуковом упрочнении мелкоблочная структура «мартенсита деформации» наблюдается в поверхностном слое глубиной до 200 мкм, что коррелируется с данными замера микротвердости. В результате фазового превращения количество остаточного аустенита снижается до 16% (рис. 4).

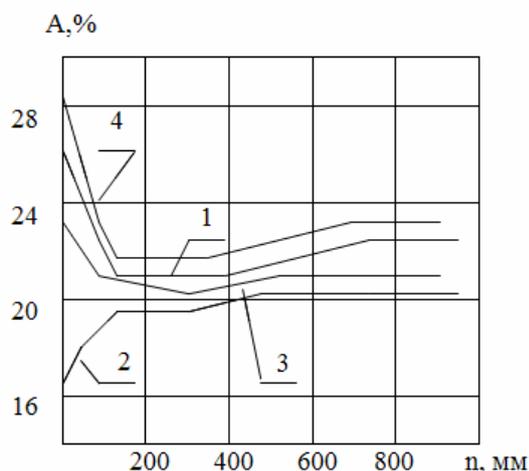


Рис. 4. Влияние УЗУ на фазовые превращения. Сталь Р6М5, $\xi=15$ мкм, $V=30$ м/мин., $d_{ш}=5$ мм, $S=0,07$ мм/об., $f=20$ кГц. 1 – $P_{СТ}=100$ Н, 2 – $P_{СТ}=250$ Н, 3 – $P_{СТ}=350$ Н, 4 – неупрочн.

Электронномикроскопические исследования титановых сплавов показали, что максимальный распад β -фазы наблюдается на по-

верхности образца и достигает глубины 100 мкм. У образцов в исходном состоянии четко различаются две фазы: светлая α -фаза и темная, в виде полос, β -фаза. В результате ультразвукового упрочнения на поверхности наблюдаются интенсивные фазовые превращения, о чем свидетельствует значительное дробление и расслоение β -фазы. Аналогичная картина наблюдается и на глубине 50 мкм. На расстоянии 100 мкм от поверхности интенсивность фазовых превращений, как и в случае рентгенографического анализа, незначительная.

Выводы: электронографические исследования подтвердили данные рентгенографического анализа и свидетельствуют о наличии $\beta \rightarrow \alpha$ превращений в поверхностном слое. Рентгенографический анализ изменения тонкой кристаллической структуры в зависимости от времени выдержки при температуре $T=350^\circ\text{C}$ показал, что кратковременный (2 часа) и длительный нагрев (50 часов) практически не вызывают структурных изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронографический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М., Металлургия, 1988. – 249 с.
2. Эпштейн, Г.Н. Высокоскоростная деформация и структура металлов / Г.Н. Эпштейн, О.А. Кайбышев. – М., Металлургия, 1985. – 182 с.

INFLUENCE OF ULTRASONIC OSCILLATIONS ON A THIN CRYSTAL STRUCTURE OF A SURFACE LAYER

© 2009 N.D. Papsheva, M.K. Alexandrov, O.M. Akushskaya

Samara State Technical University

Results of research the influence of a ultrasonic reinforcement parameters on microdistortions, density of dislocations and structural transformations in titanic alloys and rapid tool steels are resulted.

Key words: *ultrasound, reinforcement, microdistortions, density of dislocations, structurally-phase transformations*