

УДК 621.787.6

В.М.Зайцев, Р.А.Зредова

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Многие детали, согласно техническим условиям, после финишной обработки должны иметь чистоту обработки  $\nabla 9 + \nabla 10$  и упрочненный подповерхностный слой с остаточными напряжениями сжатия  $\sigma_0 = - (20+30) \text{ кг/мм}^2$ .

Эти условия успешно выполняются при применении обкатки стальным шариком или алмазного выглаживания. Однако, первый способ эффективен только при обработке жестких деталей, изготовленных из пластичных материалов, а второй не пригоден при обработке титановых сплавов из-за интенсивного налипания обрабатываемого материала на наконечник.

При упрочнении поверхностного слоя стальным шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой, статические нагрузки в несколько раз ниже, чем при обычной обкатке шариком. Налипание обрабатываемого материала на шарик отсутствует. Это дает возможность обрабатывать детали с малой жесткостью как в осевом, так и в радиальном направлении, в том числе и из титановых сплавов.

В настоящей статье излагаются результаты исследования процесса упрочнения титанового сплава BT9.

Схема процесса упрочнения наружных поверхностей тел вращения с помощью ультразвуковых колебаний и общий вид установки приведены на рис. I. Переменное электромагнитное поле ультразвуковой частоты возникает в магнестрикторе (I) за счет тока ультразвуковой частоты,

поступающего от генератора УЗГ-ЮМ. К торцу магнестрикционного преобразователя крепится концентратор (2), увеличивающий амплитуду колебаний инструмента (3). Статическое усилие (предварительный натяг) между инструментом и деталью (4) создается пружиной (5). Величина этого усилия устанавливается по индикатору (6) с помощью тарировочной таблицы.

Образцы для исследования влияния ультразвукового упрочнения на остаточные напряжения изготавливались в виде колец  $\varnothing 50 \times 44 \times 10$  и полосок шириной 5 мм, которые вырезались вдоль оси цилиндра с размерами  $\varnothing 50 \times 44 \times 70$ . Остаточные напряжения определялись по методике, разработанной в лаборатории №3 КуАИ, в основу которой положен метод Н.Н.Давиденкова.

Все образцы предварительно обрабатывались на режиме, предусмотренном технологией изготовления детали -  $V_{\text{изд}} = 25 \text{ м/мин}$ ,  $S = 0,08 \text{ мм/об}$ . При этом режиме в поверхностном слое образцов формировались остаточные напряжения растяжения, величиной  $\sigma_{\text{т}} \approx (25+30) \text{ кг/мм}^2$ , шероховатость поверхности соответствовала 7 классу.

Для упрочнения применялся индентор с вращающимся шариком из стали ШХ 15  $\varnothing 8 \text{ мм}$ . Качество упрочняемой поверхности зависит от правильности выбора режима упрочнения: статической нагрузки  $P_{\text{ст}}$ ; амплитуды -  $2\lambda$  и частоты -  $f$  колебаний, диаметра шарика  $d_{\text{ш}}$ , скорости вращения детали -  $V_{\text{д}}$ , величины продольной подачи шарика -  $S$  пр, числа проходов  $i$ .

Важнейшим из указанных параметров является статическая нагрузка -  $P_{\text{ст}}$ . Она оказывает влияние на суммарную силу, шероховатость обработанной поверхности, степень и глубину наклепа, остаточные напряжения, обеспечивает акустический контакт, позволяет широко изменять условия упрочнения.

Величиной  $P_{\text{ст}}$  исчерпывается деформационная способность материала, увеличение  $P_{\text{ст}}$  выше оптимальной приводит к "гашению" колебаний и разрушению поверхностного слоя.

В наших исследованиях  $P_{\text{ст}}$  изменялась в пределах от 10 до 35 кг при  $V_{\text{изд}} \approx 15 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,08 \text{ мм/об}$ ;  $d_{\text{ш}} = 8,0; 2\lambda = 2\lambda \approx 0,006 \text{ мм}$ . Установлено, что изменение статической нагрузки вызывает примерно прямо пропорциональное изменение величины остаточных напряжений: как тангенциальных (рис. 2а), так и осевых (рис. 2б).

Нами было исследовано влияние на остаточные напряжения следующих факторов:

скорости вращения изделия -  $V_{\text{изд}}$ , изменявшейся в пределах от 15 до 25 м/мин при  $P_{\text{ст}} = 20 \text{ кг}$ ;  $S = 0,08 \text{ мм/об}$ ;  $d_{\text{ш}} = 8,0 \text{ мм}$ ;  $2A \approx 0,006 \text{ мм}$ ;

подачи -  $S$ , изменявшейся в пределах от  $0,08 \pm 0,16 \text{ мм/об}$  при  $P_{\text{ст}} = 20 \text{ кг}$ ;  $V_{\text{изд}} = 15 \text{ м/мин}$ ;  $d_{\text{ш}} = 8,0 \text{ мм}$ ;  $2A \approx 0,006$ ;

диаметра шарика -  $d_{\text{ш}}$ , изменявшегося в пределах от 4,6 до 8,0 мм при  $P_{\text{ст}} = 20 \text{ кг}$ ;  $V = 15 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,08 \text{ мм/об}$ ;  $2A = 0,006 \text{ мм}$ .

Как показали результаты исследования, в поверхностном слое образцов на указанных режимах формируются остаточные напряжения сжатия. При этом значение осевых напряжений на аналогичных режимах в 3-4 раза выше, чем значения тангенциальных. Эпюры имеют ярко выраженные максимумы, соответствующие глубине 90-120 мкм для тангенциальных напряжений и 70-700 мкм для осевых. Величина максимальных напряжений сжатия для всего диапазона исследований колеблется в пределах:  $\sigma_{\text{т}} = 30 - 50 \text{ кг/мм}^2$  и  $\sigma_{\text{ос}} = 60 - 150 \text{ кг/мм}^2$ . Изменение скорости вращения изделия и продольного перемещения шарика в указанных выше пределах оказывает меньшее, по сравнению с  $P_{\text{ст}}$ , влияние на изменение остаточных напряжений. Изменение величины диаметра шарика вызывает примерно обратно пропорциональное изменение величины остаточных напряжений.

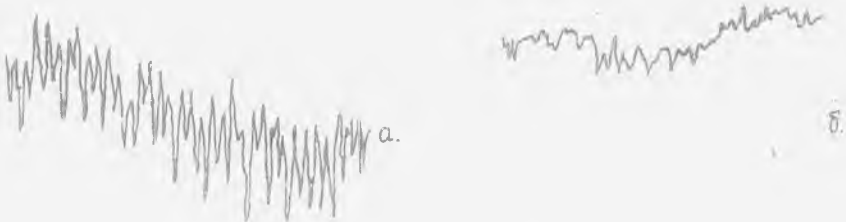


Рис.3. Профилограммы поверхности точеного и упрочненного образцов из сплава ВТ9. а) точеный образец -  $R_a = 0,75 \text{ мкм}$   $\nabla 7$ ; б) упрочненный образец ( $P_{\text{ст}} = 10 \text{ кг}$ ;  $V_{\text{изд}} = 15 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,08 \text{ мм/об}$  -  $R_a = 0,129 \text{ мкм}$   $\nabla 10$ .

Наряду с измерением остаточных напряжений, проводилось исследование шероховатости поверхности, а также глубины и степени наклепа.

Профилограммы, представленные на рис. 3, показывают, что при ультразвуковом упрочнении титанового сплава BT9 чистота поверхности повышается на 2-3 класса. При этом наибольшее влияние на изменение шероховатости обработанной поверхности оказывают статическая нагрузка  $P_{ст}$  и диаметр шарика. Увеличение  $P_{ст}$  свыше 25 кГ и уменьшение диаметра шарика вызывают резкое ухудшение чистоты обработки. Скорость вращения изделия  $V_{изд}$  и подача  $S$ , в указанных выше пределах, не вызывают заметного изменения шероховатости поверхности.

Определение глубины и степени наклепа, возникающего в процессе ультразвукового упрочнения, производилось на кольцевых образцах по методу косых срезов. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3.

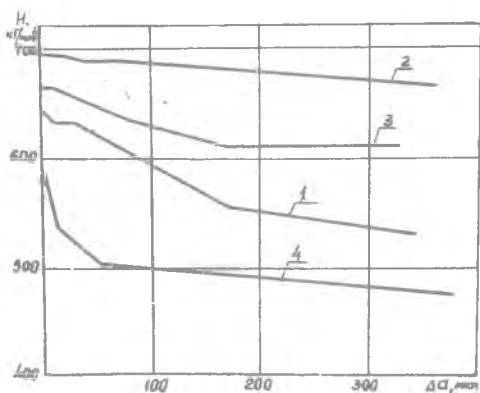


Рис. 4. Изменение микротвердости титанового сплава BT9 в зависимости от статической нагрузки.  
 ( $V_{изд} = 15$  м/мин;  
 $S = 0,08$  мм/об.)  
 1) упрочненный образец,  
 $P_{ст} = 10$  кг;  
 2) то же,  $P_{ст} = 20$  кг;  
 3) то же,  $P_{ст} = 35$  кг;  
 4) исходный точеный образец.

График изменения микротвердости титанового сплава BT9 в зависимости от статической нагрузки  $P_{ст}$ , изменявшейся в пределах 10-35 кГ, приведен на рис. 4. Из рассмотрения графика видно, что с увеличением нагрузки наклеп и глубина его проникновения увеличиваются, интенсивность наклепа достигает  $\approx 40\%$ .

Таким образом, в качестве оптимального режима упрочнения, обеспечивающего получение поверхности с шероховатостью  $\nabla 9 - \nabla 10$  и сжимающими остаточными напряжениями, можно рекомендовать следующий:  
 $P_{ст} = 20$  кГ;  $V_{изд} = 15$  м/мин;  $S = 0,08$  мм/об;  $d_{ш} = 8$  мм.

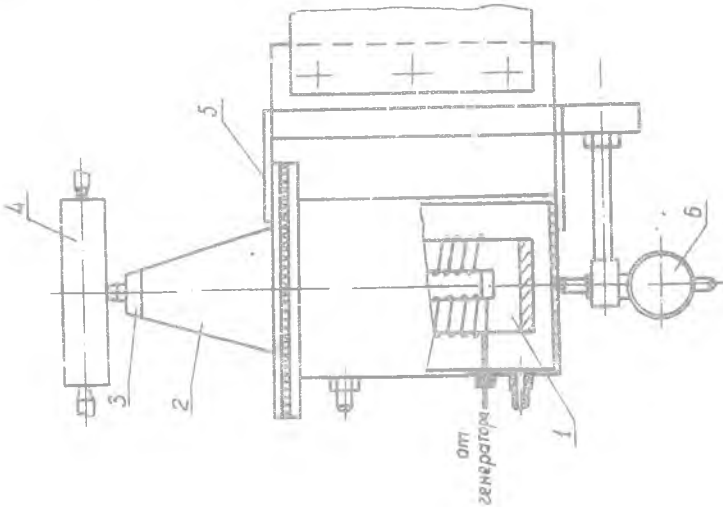
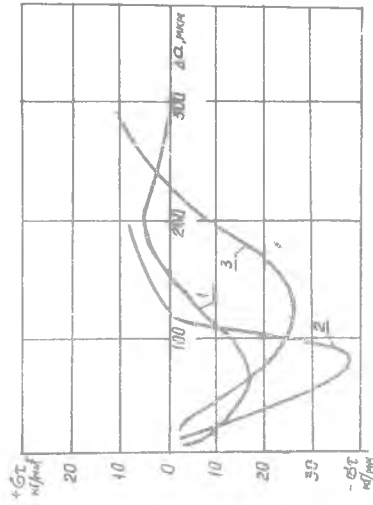


Рис. 1. Схема установки для ультразвукового упрочнения.



а)

Рис. 2. Зависимость тангенциальных (а) и осевых (б) остаточных напряжений от статической нагрузки.

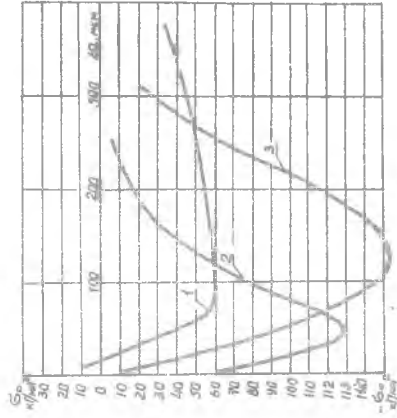
$\nu$  изд = 1,5 м/мин;

$S = 0,008$  мм/об;

1)  $P_{ст} = 10$  кг;

2)  $P_{ст} = 20$  кг;

3)  $P_{ст} = 35$  кг.



б)

При изменении диаметра детали или упрочняющего шарика режим упрочнения должен быть скорректирован для обеспечения физического подобия процесса, то-есть необходимо сохранить неизменными сплошность пятен контакта в осевом и тангенциальном направлениях, а также удельное давление упрочнения. Это достигается изменением скорости вращения изделия, продольной подачи и статической нагрузки.