

Анализ взаимной совместимости геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя изделий из титанового сплава после ультразвуковой обработки

д.т.н. проф. Таратынов О.В., Харченко В.В., Корнеев Д.В.
МГИУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана
(495) 620-39-59, (916) 987-88-80, vlad_khar@rambler.ru,
(926) 268-19-60, korneev_bmstu@bk.ru

Аннотация. В статье рассмотрена технология финишной обработки металлов поверхностно-пластическим деформированием для улучшения качества их поверхностного слоя. Проведён анализ взаимной совместимости геометрических и физико-механических характеристик поверхности после ультразвуковой обработки и даны практические рекомендации по управлению качеством получаемых изделий.

Ключевые слова: качество поверхностного слоя, поверхностно-пластическое деформирование, технология механической обработки.

Ультразвуковая обработка (УЗО) является прогрессивной технологией финишной обработки материалов методом поверхностно-пластического деформирования (ППД). В отличие от классических статических методов ППД, работающих по схемам качения и скольжения, таких как накатывание и выглаживание, УЗО представляет собой процесс динамического импульсного внедрения твёрдосплавного индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, в поверхностный слой заготовки. В процессе обработки происходит существенное снижение высотных параметров топографии поверхности благодаря заполнению впадин металлом деформированных выступов, что приводит к уменьшению среднего шага неровностей и увеличению относительной опорной длины профиля. Вследствие этого снижается коэффициент трения, определяющий период приработки сопрягаемых поверхностей, возрастает контактная жёсткость, оказывающая сопротивление усталостному выкрашиванию, увеличивается опорная площадь поверхности, влияющая на износостойкость, повышается точность посадок и герметичность соединений. Благодаря появлению наклёпа в поверхностном слое увеличивается твёрдость за счёт уплотнения микроструктуры металла, происходит деформация кристаллической решётки с увеличением плотности дислокаций внутри зёрен, образуются остаточные сжимающие напряжения. В результате этого улучшаются такие эксплуатационные свойства изделий, как прочность и усталостная выносливость. Кроме того, отпечатки от действия индентора формируют на обработанной поверхности регулярный маслоёмкий рельеф, служащий для сохранения наносимых смазок и собирающий появляющиеся в процессе эксплуатации продукты износа, что также значительно повышает износостойкость деталей. Благодаря этому УЗО позволяет получать изделия с высокими эксплуатационными свойствами, которые напрямую зависят от качества поверхностного слоя, представляющего собой интегральную характеристику, состоящую из геометрических и физико-механических показателей.

Для изучения влияния технологических режимов УЗО на состояние поверхности изделий нами были проведены экспериментальные исследования по методике полного двухфакторного эксперимента $N = 2^2$ с целью получения регрессионных зависимостей методами математическо-статистического анализа. Для сопоставления экспериментальных данных и рассчитанных на их основе регрессионных уравнений каждый из двух факторов принимал 5 различных значений (верхнее +1, промежуточное +0,5, центральное 0, промежуточное -0,5, нижнее -1). Таким образом, схема проведения эксперимента включала в себя 25 независимых опытов. Режимы УЗО имели следующие значения: частота $f = 20$ кГц, амплитуда $A = 10$ мкм, радиус бочкообразного индентора $R_{инд} = 12$ мм, величина поперечной подачи $S_{поп} = 0,05$ мм/шаг, величина продольной подачи $S_{прод} = 180...360$ мм/мин, сила статического

прижима $F_{ст} = 50 \dots 150$ Н.

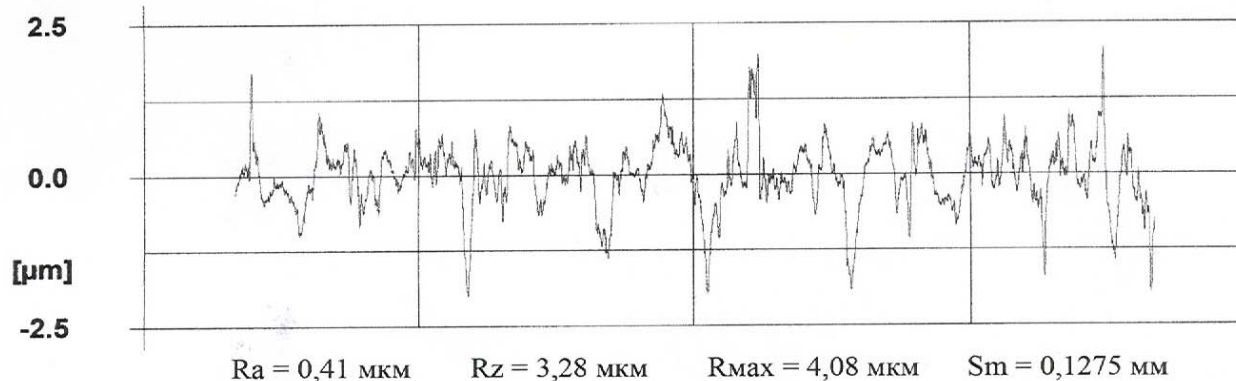


Рисунок 1 – Исходная шероховатость поверхностного слоя заготовки из титанового сплава ВТ6

В качестве исходного образца использовалась плоская заготовка из деформируемого титанового сплава марки ВТ6 (Ti-6Al-4V), подвергнутая горячей обработке давлением с последующим отжигом в верхнем температурном интервале ($\alpha + \beta$)-области и предварительно обработанная методом чистового фрезерования на вертикально-фрезерном 3-координатном станке AGIE Mikron VCE-600. Геометрические показатели качества поверхностного слоя имели следующие значения (рисунок 1): высотные параметры шероховатости $R_{a \text{ исх}} = 0,41$ мкм, $R_{z \text{ исх}} = 3,28$ мкм, $R_{\text{max исх}} = 4,08$ мкм; шаговые параметры шероховатости $S_{m \text{ исх}} = 0,1275$ мм, $t_{m \text{ исх}} = 50\%$; общая высота волнистости профиля $W_{t \text{ исх}} = 1,18$ мкм. Физико-механические показатели качества поверхности выглядели следующим образом: твёрдость на поверхности $HRB_{\text{исх}} = 106$, микротвёрдость на глубине 20 мкм $HV_{\text{исх}} = 450$; остаточные макронапряжения $\sigma_{\text{ост исх}} = -90$ МПа.

Для изучения влияния технологических режимов УЗО на геометрические характеристики поверхностного слоя (шероховатость и волнистость) были обработаны результаты всего плана эксперимента (№ 1...25), а на физико-механические характеристики (микротвёрдость, остаточные макронапряжения, глубина наклёпа) – нижнее № 1 ($F_{ст} = 50$ Н и $S_{\text{прод}} = 360$ мм/мин), центральное № 13 ($F_{ст} = 100$ Н и $S_{\text{прод}} = 270$ мм/мин) и верхнее № 25 ($F_{ст} = 150$ Н и $S_{\text{прод}} = 180$ мм/мин) значения плана. При этом во всех случаях полученные экспериментальные значения сравнивались с исходным образцом.

Обработка эмпирических данных производилась на следующем оборудовании: цифровой профилометр Hommel Tester T8000-RC120-400 (Германия), универсальный цифровой твердомер Affri 251 VRSD (Италия), цифровой микротвердомер Affri DM8 (Италия), автоматический многофункциональный рентгеновский дифрактомер общего назначения ДРОН-7 (Россия), металлографический инвертированный оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer.A1m (Германия). Горизонтальные и поперечные шлифы были вырезаны из заготовки с помощью электроэрозионного станка AGIE Classic V2 и подверглись последовательно шлифованию и полированию для получения ровной зеркальной поверхности, электролитической полировке для удаления образовавшегося наклёпанного слоя и химическому травлению для выявления микроструктуры.

После обработки образцов на указанных режимах УЗО шероховатость поверхности R_a снизилась в 2...4 раза, R_z - в 1,9...3,7 раз, R_{max} - в 1,4...3,6 раз, средний шаг неровностей профиля S_m уменьшился в 3,4...5,8 раз, относительная опорная длина t_m увеличилась в 1,1...1,9 раз, а волнистость W_t уменьшилась в 1,2...3,2 раза (на 20 из 25 обработанных дорожек), достигнув следующих значений (рисунок 2): $R_a = 0,10 \dots 0,20$ мкм, $R_z = 0,88 \dots 1,68$ мкм, $R_{\text{max}} = 1,13 \dots 2,82$ мкм, $S_m = 0,0221 \dots 0,375$ мм, $t_m = 55 \dots 95\%$, $W_t = 0,37 \dots 1$ мкм.

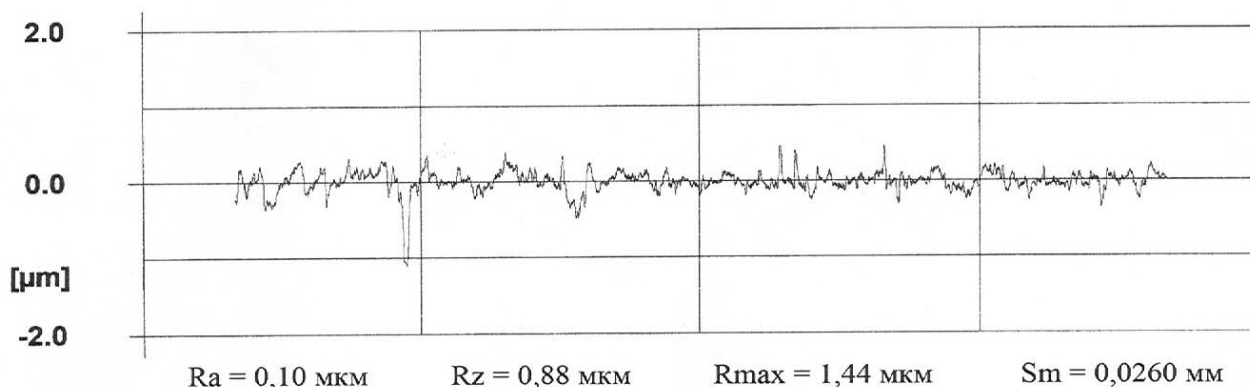


Рисунок 2 – Шероховатость поверхностного слоя обработанного образца при $F_{ст} = 50 \text{ Н}$ и $S_{прод} = 180 \text{ мм/мин}$

Была установлена закономерность снижения шероховатости поверхности при уменьшении статической силы прижима инструмента к заготовке и величины подачи в исследуемом технологическом диапазоне режима обработки.

Путём использования метода множественной линейной регрессии с помощью программного приложения Microsoft Excel нами были получены математические зависимости, устанавливающие связь между входными (технологическими) и выходными (геометрическими) параметрами УЗО, позволяющие прогнозировать высотные и шаговые значения неровностей профиля обработанной поверхности в исследуемом диапазоне режимов обработки:

$$R_a = 0,03 + 4,5 \times 10^{-4} \times F_{cm} + 3 \times 10^{-4} \times S_{прод}; \quad (1)$$

$$S_m = 0,01 + 7,5 \times 10^{-5} \times F_{cm} + 4,3 \times 10^{-5} \times S_{прод}; \quad (2)$$

$$t_m = 127,5 - 0,175 \times F_{cm} - 0,15 \times S_{прод}. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации R^2 полученных регрессионных уравнений составил соответственно 96%, 94% и 95%, что говорит об их статистической значимости.

На основании сопоставления экспериментальных и расчётных данных были получены регрессионные зависимости, отражающие закономерность изменения параметров шероховатости поверхностного слоя в зависимости от выбранного режима обработки (рисунок 3).

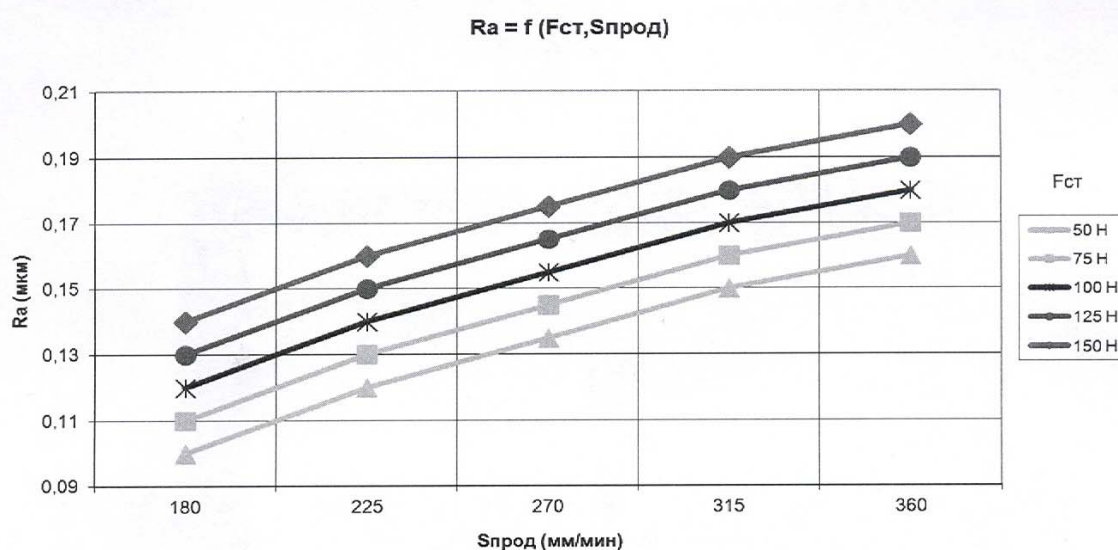


Рисунок 3 – График зависимостей шероховатости R_a (мкм) от величины подачи $S_{прод} = 180 \dots 360$ (мм/мин) при различных значениях силы статического прижима инструмента к заготовке $F_{ст} = 50 \dots 150$ (Н)

Волнистость обработанной поверхности снизилась на двадцати экспериментальных дорожках, на двух осталась практически неизменной (1,14 мкм и 1,20 мкм), а на трёх увеличилась до значений 1,25...1,35 мкм. При этом, ввиду большого разброса эмпирических данных, оказалось невозможно установить закономерность изменения величины волнистости в зависимости от выбранных технологических режимов.

Данное явление объясняется следующим образом. Поскольку до начала обработки индентор прижимается к поверхности заготовки с некоторым статическим усилием, во время продольной подачи в направлении движения инструмента образуется передняя внеконтактная зона, определяющая вид очага деформации, вследствие чего перед индентором набегают пластическая волна, высота которой постоянна и зависит от силы статического прижима [1]. Однако благодаря наличию ультразвуковых колебаний индентор дополнительно внедряется в поверхность заготовки на глубину, равную амплитуде, и с периодичностью, определяемую частотой. В результате этого высота волны оказывается непостоянной и может изменяться в пределах десятых долей микрометра. Очевидно, что накапливающийся «излишек» волны либо периодически подминается под инструмент, либо расходится по сторонам, вследствие чего во время снятия профилограмм на разных участках обработанных дорожек значение волнистости различалось в пределах указанных величин.

В целом же можно заключить, что УЗО приводит к выравниванию профиля обработанной заготовки, поскольку большинство значений волнистости (80% плана эксперимента) находится в пределах 1 мкм. Что касается отдельно взятых дорожек, то небольшое увеличение показателей может быть связано с изначальным дефектом обрабатываемой поверхности на данных участках, либо с набежавшей и недеформированной индентором волной.

После обработки заготовки на указанных режимах УЗО твёрдость поверхности образцов № 1, № 13 и № 25 повысилась до средней величины $HRB = 108...110$.

При этом необходимо отметить, что, ввиду большого усилия вдавливания стального шарика (100 кгс) в поверхность заготовки по методу Роквелла со шкалой HRB, определить точнее изменение твёрдости не представлялось возможным. Поэтому для более детальной оценки было решено провести исследование изменения величины микротвёрдости по глубине поверхностного слоя с гораздо меньшим усилием вдавливания алмазной пирамиды (0,2 кгс) по методу Виккерса HV 0,2 / 10.

В образце № 1, характеризуемом наименьшей степенью наклёпа, микротвёрдость увеличилась в среднем на 30 единиц, в образце № 13 со средней степенью наклёпа – примерно на 50 единиц, а в образце № 25 с наибольшей степенью наклёпа - приблизительно на 90 единиц, достигнув следующих среднеарифметических значений: $HV_1 \approx 470$; $HV_{13} \approx 500$; $HV_{25} \approx 540$.

Была установлена закономерность повышения микротвёрдости поверхностного слоя при увеличении статической силы прижима инструмента к заготовке и уменьшении величины подачи в исследуемом технологическом диапазоне режима обработки. При этом необходимо отметить, что данная зависимость носит параболический характер.

Анализ изменения микротвёрдости по глубине поверхностного слоя показал, что по мере удаления от поверхности её уровень постепенно снижается и достигает в конечном итоге значений, близких к исходному. Однако ввиду достаточно большого разброса экспериментальных данных, вызванных неоднородным фазовым составом исследуемого титанового сплава, невозможно установить строгую закономерность изменения микротвёрдости по глубине. Поэтому на рисунке 4 представлена аппроксимированная зависимость снижения микротвёрдости по мере удаления от поверхности.

После обработки заготовки на указанных режимах УЗО в деформированном слое появились значительные сжимающие макронапряжения, которые достигли своего максимума на поверхности детали. Последний факт говорит о том, что в процессе деформации не был превышен предел прочности титанового сплава (т.е. достигнут перенаклёп), сопровождаемый

снижением показателей качества приповерхностного слоя.

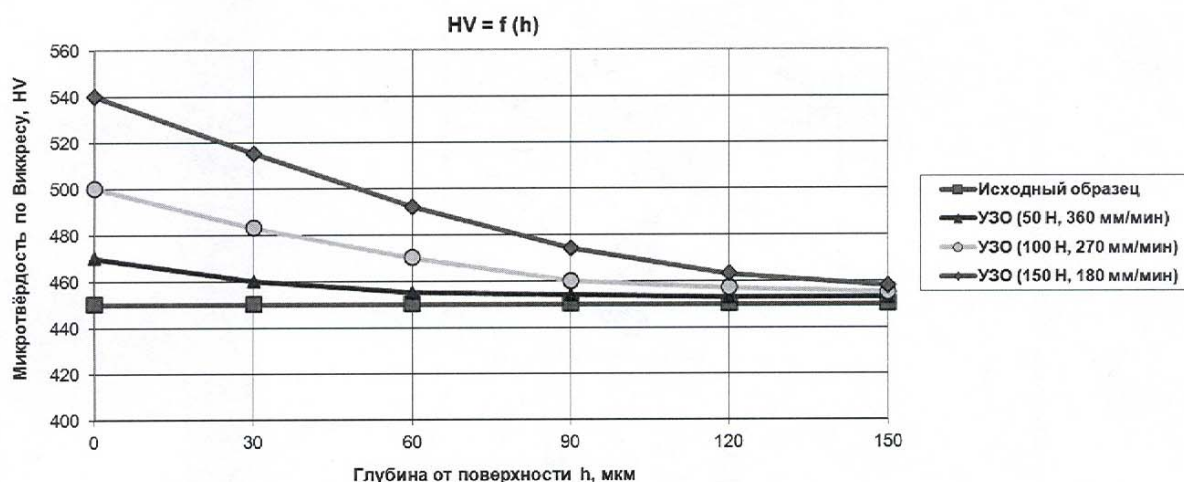


Рисунок 4 – Аппроксимированная зависимость изменения микротвёрдости HV ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) поверхностного слоя сплава ВТ6 по глубине h (мкм)

В образце № 1 уровень остаточных сжимающих макронапряжений повысился в 6 раз, в образце № 13 - в 7,4 раза, а в образце № 25 - в 8,3 раза, достигнув следующих значений: $\sigma_{\text{ост } 1} = -540$ МПа; $\sigma_{\text{ост } 13} = -670$ МПа; $\sigma_{\text{ост } 25} = -750$ МПа.

Была установлена закономерность повышения остаточных сжимающих макронапряжений поверхностного слоя при увеличении статической силы прижима инструмента к заготовке и уменьшении величины подачи в исследуемом технологическом диапазоне режима обработки. При этом необходимо отметить, что данная зависимость носит экспоненциальный характер, соответствующий кривой упрочнения σ - ϵ для титановых сплавов.

Послойный анализ макронапряжений показал, что в приповерхностных слоях их уровень постепенно уменьшается и достигает в конечном итоге значения порядка -100 МПа на глубине 60 мкм для образца №1, 100 мкм для образца №13 и 160 мкм для образца №25. Интенсивность снижения абсолютного уровня напряжений не зависит от степени поверхностной деформации и составляет порядка 120...140 МПа на каждые 20 мкм (рисунок 5).

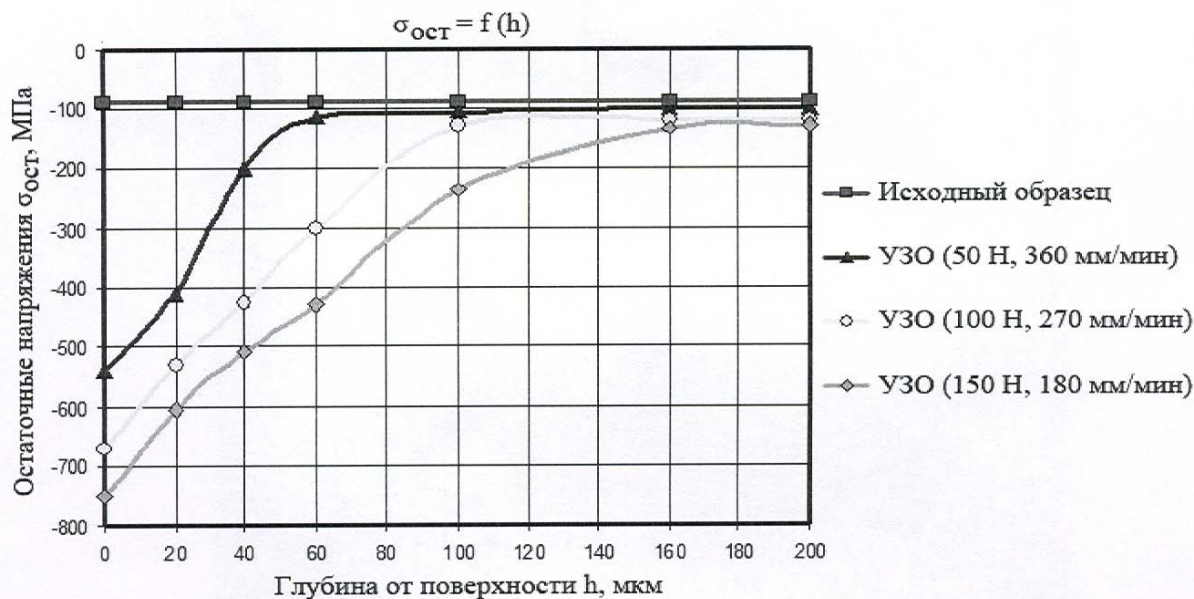


Рисунок 5 – Эпюра распределения величины остаточных макронапряжений $\sigma_{\text{ост}}$ (МПа) поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 по глубине h (мкм) в результате послойного анализа

Глубина деформированного поверхностного слоя определялась комбинированным ме-

Раздел 2. Технология машиностроения и материалы.

тодом – по анализу микроструктуры поперечных шлифов и по изменению уровня макронапряжений. Было установлено, что глубина наклёпа изменяется в зависимости от режима обработки (рисунок 6): $h_{n1} = 60 \dots 70$ мкм; $h_{n13} = 100 \dots 110$ мкм; $h_{n25} = 140 \dots 160$ мкм.

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что глубина деформированного слоя возрастает при увеличении силы статического прижима инструмента к заготовке и уменьшении величины продольной подачи. При этом данная зависимость носит линейный характер.

Как можно заметить, наилучшие значения показателей качества геометрических и физико-механических характеристик обработанных заготовок достигаются на различных режимах обработки. На основании результатов проведённых исследований и сопоставления полученных данных с выводами других авторов [2, 3], использующих технологию УЗО, можно прийти к следующему выводу. В исследуемом технологическом диапазоне режима обработки снижению шероховатости поверхностного слоя способствует уменьшение статической силы прижима инструмента к заготовке $F_{ст}$, величины продольной подачи $S_{прод}$ и амплитуды ультразвуковых колебаний A , а также увеличение формы и радиуса индентора $R_{инд}$. С другой стороны, для повышения микротвёрдости, остаточных сжимающих напряжений и глубины наклёпа требуется увеличение статической силы $F_{ст}$ и амплитуды A , а также снижение величины продольной подачи $S_{прод}$ и площади пятна контакта инструмента и заготовки посредством уменьшения формы и радиуса индентора $R_{инд}$. Таким образом, единственным технологическим параметром режима обработки, одинаково влияющим на улучшение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя деталей, является подача инструмента. Для выбора значений остальных технологических параметров необходимо исходить из условий эксплуатации и назначения изделий, которые определяются на этапе конструирования.

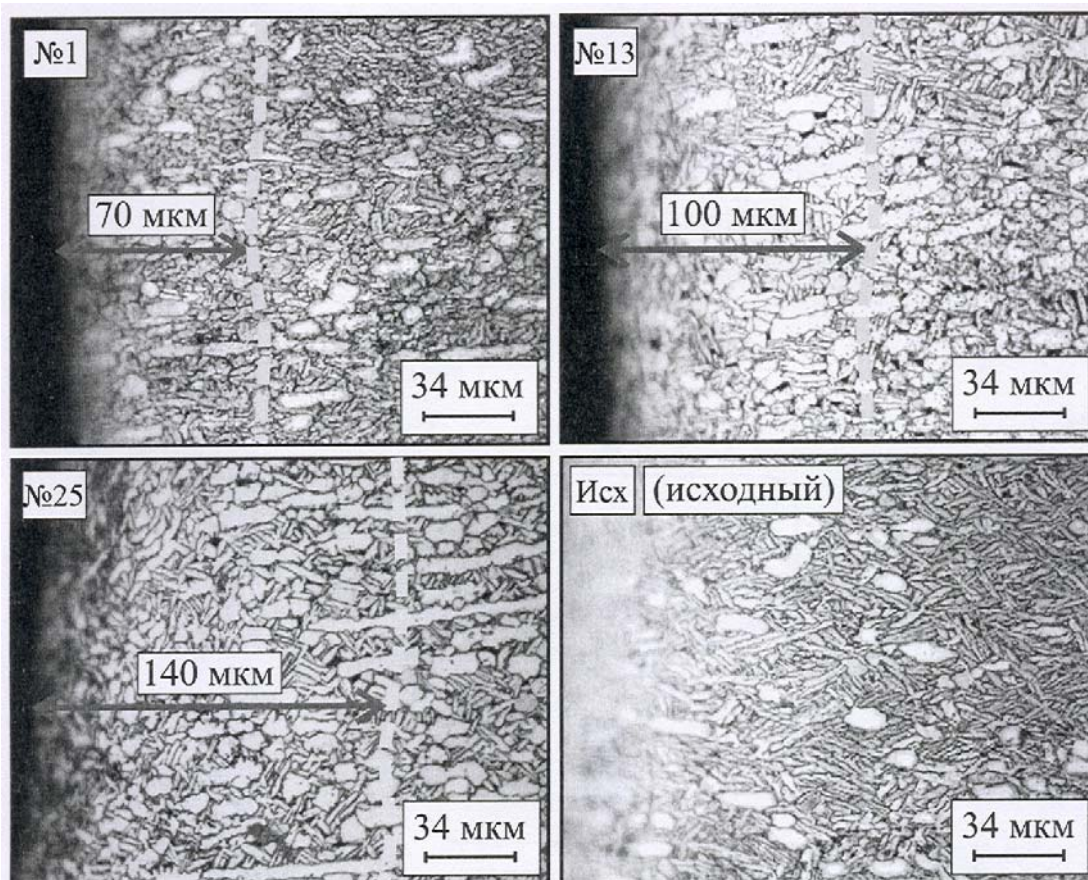


Рисунок 6 – Микроструктура поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 до и после УЗО ($\times 280$)

Стоит отметить, что для достижения высокой чистоты поверхности финишную обработку методом УЗО следует производить только после чистовой лезвийной подготовки образца на предыдущей стадии технологического процесса (точения или фрезерования) [2].

Управление качеством выпускаемой продукции целесообразно осуществлять на основе контроля шероховатости поверхности как универсального показателя результата обработки. Используя установленную корреляционную связь между геометрическими и физико-механическими характеристиками поверхностного слоя изделий из титанового сплава при применении технологии УЗО посредством расчёта регрессионных уравнений, можно просчитать значения получаемой шероховатости и спрогнозировать соответствующие ей микротвёрдость, остаточные напряжения и глубину наклёпа.

Практический интерес представляет также сравнение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя изделий из титановых сплавов, обработанных классическим методом ППД – накатыванием, с технологией УЗО. Так, в работе [4] обкатыванию подверглись титановые сплавы ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9, имеющие следующие показатели качества поверхности: исходную шероховатостью $R_{a\text{исх}}$ порядка 1,8 мкм; твёрдость ВТ3-1 - $HV_{\text{исх}} = 310$, ВТ8 - $HV_{\text{исх}} = 330$, ВТ9 - $HV_{\text{исх}} = 350$; остаточные сжимающие напряжения в сплаве ВТ3-1 отсутствуют. Путём проведения серии экспериментов показатели качества улучшились до следующих значений: для сплава ВТ3-1 - $R_a = 0,2$ мкм, $HV = 375$, $\sigma_{\text{ост}} = 95$ МПа на поверхности и $\tau_{\text{ост}} = -45$ МПа на расстоянии 250 мкм с общей глубиной наклёпа порядка 800 мкм; для сплава ВТ8 - $R_a = 0,2$ мкм, $HV = 385$; для сплава ВТ9 - $R_a = 0,3$ мкм, $HV = 390$.

В работе [5] обкатыванию подверглись титановые сплавы ВТ1-0, ВТ3-1 и 3М, имеющие следующие показатели качества поверхности: ВТ1-0 - $R_{a\text{исх}} = 1,1$ мкм, $R_{z\text{исх}} = 4$ мкм, $R_{\text{max исх}} = 5,5$ мкм, $HV_{\text{исх}} = 150$; ВТ3-1 - $R_{a\text{исх}} = 1$ мкм, $R_{z\text{исх}} = 3,7$ мкм, $R_{\text{max исх}} = 5$ мкм, $HV_{\text{исх}} = 330$; 3М - $R_{a\text{исх}} = 1,1$ мкм, $R_{z\text{исх}} = 4,2$ мкм, $R_{\text{max исх}} = 5,5$ мкм, $HV_{\text{исх}} = 235$ (микротвёрдость во всех случаях измерялась на глубине 20 мкм). Путём проведения серии экспериментов автору удалось добиться следующих значений показателей качества: для сплава ВТ1-0 - $R_a = 0,6$ мкм, $R_z = 1,2$ мкм, $R_{\text{max}} = 2,7$ мкм, $HV = 360$; для сплава ВТ3-1 - $R_a = 0,2$ мкм, $R_z = 1,1$ мкм, $R_{\text{max}} = 1,7$ мкм, $HV = 530$; для сплава 3М - $R_a = 0,3$ мкм, $R_z = 1,2$ мкм, $R_{\text{max}} = 1,9$ мкм, $HV = 430$.

Анализируя представленные эмпирические данные, можно сделать вывод, что технология УЗО позволяет добиться лучших показателей микрогеометрии поверхностного слоя. Прирост твёрдости после обработки титановых сплавов в целом сопоставим, а с остаточными макронапряжениями картина неоднозначна: накатывание позволяет получить большую глубину наклёпа с растянутым градиентом спада напряжений, но меньшее значение по абсолютной величине.

Выводы

На основании проведённых экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что после использования ультразвуковой обработки в качестве финишной операции технологического процесса происходит значительное улучшение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя изделий из титанового сплава. При этом УЗО имеет очевидное преимущество перед классической технологией ППД методом обкатывания. В частности, всего за один проход инструмента среднеарифметическая шероховатость исследуемых образцов снизилась со значения $R_{a\text{исх}} = 0,4$ мкм до $R_a = 0,1$ мкм, а величина остаточных сжимающих макронапряжений возросла с $\sigma_{\text{ост исх}} = -90$ МПа до $\sigma_{\text{ост}} = -750$ МПа.

Вместе с тем взаимная совместимость геометрических и физико-механических характеристик имеет обратно пропорциональную зависимость. Была установлена закономерность снижения параметров шероховатости при уменьшении силы статического прижима инструмента к заготовке и величины продольной подачи, которая имеет характер, близкий к линей-

ному. При увеличении силы статического прижима и уменьшении величины подачи наблюдается закономерность повышения микротвёрдости, остаточных сжимающих макронапряжений и глубины наклёпа. При этом в первом случае изменение носит параболический характер, во втором – экспоненциальный, а в третьем – линейный. Таким образом, внутренняя совместимость физико-механических характеристик имеет прямо пропорциональный нелинейный характер.

Управление качеством поверхностного слоя изделий предлагается осуществлять посредством использования полученных регрессионных уравнений для расчёта параметров шероховатости и прогнозировать соответствующие ей физико-механические характеристики на основе установленной корреляционной связи между ними после ультразвуковой обработки.

Литература

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Боровин Ю.М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГИУ, 2005.
3. Ким Чанг Сик. Технологические и структурные закономерности ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки конструкционных и инструментальных материалов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГИУ, 2005.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
5. Колеватов В.В. Повышение качества упрочнения деталей из титановых сплавов путём применения комбинированной обработки поверхностным пластическим деформированием и микродуговым оксидированием (на примере деталей центробежных насосов). Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГТУ «МАМИ», 2003.

Сравнительная оценка погрешности при шлифовании колец подшипников

д.т.н. проф. Колтунов И.И.

МГТУ «МАМИ»

8 (495) 223-05-23, доб. 1506, iik@mami.ru

Аннотация. В статье рассмотрена методика выбора схемы шлифования на этапе проектирования операции. Разработана математическая модель процесса шлифования кольца подшипника. Получены численные значения величины погрешности обработки внутренних поверхностей колец подшипников для различных схем шлифования.

Ключевые слова: подшипники качения, кольца, шлифование, погрешности, математическая модель, графы, система координат, опорные точки, сравнительная оценка, элементы технологической системы.

Подшипники качения являются основным видом опор вращающихся и качающихся деталей машин и механизмов различного целевого назначения. Совершенствование машин - увеличение сроков службы, повышение скоростей и производительности, снижение габаритов и веса, а также повышение точности - требует дальнейшего улучшения конструкций подшипников качения и совершенствования технологических процессов их изготовления.

При чистовой обработке внутренних поверхностей деталей вращения наибольшее распространение имеет процесс шлифования. Применяют три схемы шлифования: внутреннее