

УДК 621.9.048.6

А. Г. Самуль, аспирант, В. П. Гилета, к.т.н., доцент, А. И. Насонов, аспирант
Новосибирский государственный технический университет, Россия
E-mail: samul.2012@corp.nstu.ru

МИКРОГЕОМЕТРИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В работе на основании сравнения кинематических параметров ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (УЗПД) при различных направлениях колебаний инструмента к поверхности, выбрана касательная схема УЗПД для деталей из алюминиевых сплавов Д16 и Д16Т. Исследовано влияние статической нагрузки и скорости обработки на микрогеометрическое состояние образцов. Выявлено, что данная обработка формирует отличную от алмазного выглаживания топографию поверхности и обеспечивает уменьшение высотных параметров шероховатости.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, микрогеометрия, колебания, шероховатость

A. G. Samul, B. P. Gileta, A. I. Nasonov

MICROGEOMETRY OF PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS AFTER ULTRASONIC SURFACE-PLASTIC DEFORMATION

In this work the tangent scheme of USM for parts made of aluminum alloys D16 and D16T is selected based on a comparison of the kinematic parameters of ultrasonic surface machining (USM) at different directions of vibration of the tool to the surface. The effect of static load and machining speed on the microgeometric state of the samples is investigated. It is revealed that this machining forms a surface topography different from diamond burnishing and provides a decrease in the height parameters of roughness.

Keywords: ultrasonic surface machining, surface micro-geometry, vibrations, roughness.

Введение

С развитием науки и техники постоянно увеличивается номенклатура изготавливаемых машин и ассортимент используемых материалов. При этом обеспечение высоких эксплуатационных свойств достигается как за счёт применения современных конструктивных решений и материалов, так и совершенствования технологий производства деталей.

В настоящее время наряду с лезвийной и абразивной обработкой деталей широко применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые при незначительных экономических затратах обеспечивают благоприятное, с эксплуатационной точки зрения, сочетание геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя.

Свойства ПС, формируемые при ППД, во многом определяются как силовыми факторами, так и характером взаимодействия инструмента (индентора) с обрабатываемой поверхностью. По этим признакам все методы ППД подразделяются на статические и динамические. Отличительной особенностью последних является наличие импульсного характера воздействия индентора на поверхность детали, что позволяет более полно реализовывать пластические свойства обрабатываемых материалов.

Одним из перспективных представителей динамических методов ППД является поверхностное пластическое деформирование инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой (УЗПД). Этот метод позволяет интенсифицировать пластическое течение материала поверхностного слоя детали и обеспечивать высокий выглаживающий и упрочняющий эффект на деталях, выполненных из материалов средней и высокой

твёрдости (>100 HV) [1-3]. При этом применяются колебания, направленные по нормали к обрабатываемой поверхности (нормальная схема) [4-7]. Процесс характеризуется высокими скоростями деформирования, которые позволяют реализовать максимальный деформационный эффект. Данному методу обработки посвящено множество исследований, и он получил широкое распространение на предприятиях машиностроения.

Применение УЗПД (по нормальной схеме) для деталей из цветных металлов и сплавов с твёрдостью менее 100HV показало, что в результате интенсивного течения материала поверхностного слоя происходит образование волнистости, и не обеспечивается требуемого качества ПС. Одним из возможных путей преодоления этой проблемы является изменение схемы напряжённо-деформированного состояния в очаге деформирования. Этого можно достичь путём подбора кинематико-динамических параметров УЗПД, в частности, сменой направления вектора колебательной скорости относительно поверхности детали. Для решения этой проблемы была предложена схема с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности. Данный способ недостаточно освещён и его изучение вызывает практический и научный интерес. Поэтому определение возможности применения УЗПД по тангенциальной схеме для улучшения качества поверхности деталей, выполненных из цветных материалов, а также тонких износостойких покрытий является актуальной задачей.

В связи с этим целью являлось обеспечение стабильного качества поверхностного слоя с малыми значениями высотных параметров шероховатости при ультразвуковой обработке на материалах низкой твёрдости, на примере алюминиевых сплавов Д16 (34 HV) и Д16Т (57 HV).

Сравнение схем УЗПД.

Схема УЗПД с колебаниями инструмента по касательной к обрабатываемой поверхности представлена на рисунке 1. В ней сменный концентратор-инструмент (3) совершает осевые колебания (колебательная скорость V_k) с закрепленным на боковой поверхности индентором (2). Инструмент усилием P_{CT} , создаваемым грузом (6), прижимается к поверхности обрабатываемой детали 1.

Сравнение УЗПД (рис. 1) от широко применяемого (рис. 2) показывает, что при изменении направлений колебаний с нормального на касательное приводит к преобразованию характера контакта индентора и детали с ударного на постоянный. Эти изменения приводят к смене вида следа обработки на деформируемой поверхности (рис. 3,4).

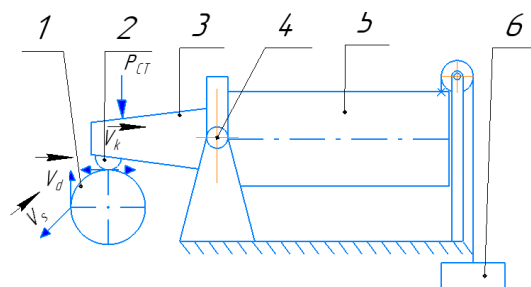


Рисунок 1. УЗПД по тангенциальной схеме: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – индентор, 3 – волновод, 4 – ось качания, 5 – магнитострикционный преобразователь, 6 – груз, P_{CT} – статическая нагрузка, V_s – вектор скорости подачи индентора, V_d – вектор окружной скорости детали, V_k – вектор колебательной скорости индентора

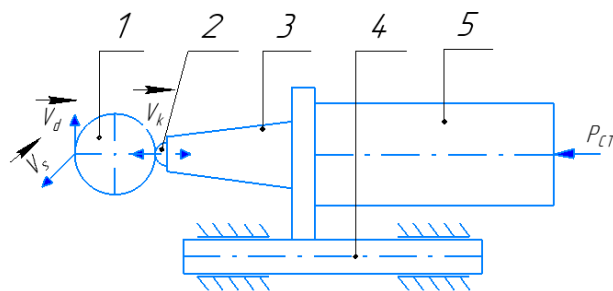


Рисунок 2. УЗДП по нормальной схеме: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – индентор, 3 – волновод, 4 – направляющая, 5 – магнитострикционный преобразователь, $P_{ст}$ – статическая нагрузка, V_s – вектор скорости подачи индентора, V_d – вектор окружной скорости детали, V_k – вектор колебательной скорости индентора

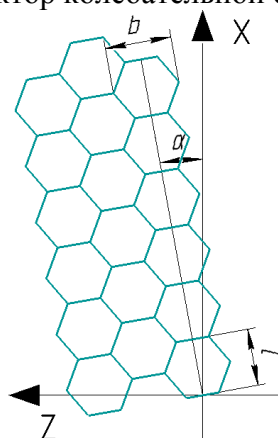


Рисунок 3. Траектория следа обработки по нормальной схеме УЗДП: α – угол наклона траектории следа к длине окружности детали; b – ширина следа (единичного пластического отпечатка); l – расстояние между одноимёнными точками следа

Из рис. 3 видно, что характер следа поверхности будет определяться количеством воздействий (ударов) деформатора на единицу поверхности детали и границами их пересечений.

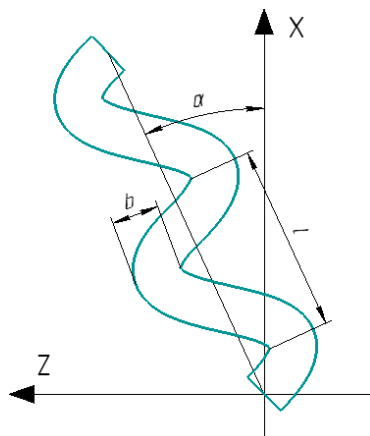


Рисунок 4. Траектория следа обработки по тангенциальной схеме УЗДП: α – угол наклона траектории следа к длине окружности детали; b – ширина отпечатка обработки; l – расстояние между одноимёнными точками следа

УЗПД по касательной схеме формирует след в виде синусоиды (см. рис. 4) параметры которой будут определяются, в основном, соотношением скорости детали к колебательной скорости инструмента и их направлениями.

Особенности формируемой геометрии после УЗПД

При этом траектория перемещения индентора по обрабатываемой детали описывается системой уравнений [8]

$$\begin{cases} Z = V_s t + A_0 \sin(2\pi f t) \sin\beta & (1) \\ X = V_v t + A_0 \sin(2\pi f t) \cos\beta & (2) \end{cases}$$

где A_0 – амплитуда колебаний (мкм), f – частота колебаний, t – время (с), β – угол ввода колебаний

Из широко применяемых методов ППД УЗПД по тангенциальной схеме наиболее близко, по кинематическим параметрам, с процессом алмазного выглаживания (АВ). При АВ тел вращения формируемая микрогеометрия определяется шириной следа инструмента на одном обороте детали и подачи, создание полностью нового микрорельефа возможно при соблюдении условия S (подача) $\leq b$ (рис. 5).

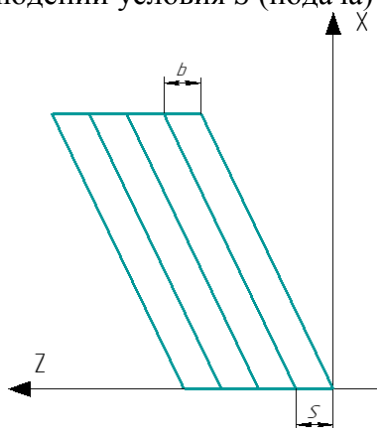


Рисунок 5. Расположение следов АВ, при условии формирования нового рельефа поверхности.

Применение УЗПД по касательной приводит к формированию более сложного следа на поверхности детали, характеристика которого кроме главной скорости и подачи будет определяться величиной амплитуды колебаний ($2A$) и углом β (рис. 6).

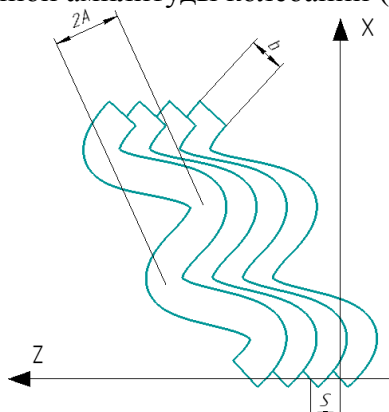


Рисунок 6. Расположение следов обработки УЗПД по касательной схеме, при условии формирования нового рельефа поверхности

Для экспериментальных исследований были подготовлены образцы из сплавов Д16 (34 HV) и Д16Т (57 HV). Выбор данных материалов аргументирован тем, что данные материалы широко применяются в авиационной, космической и приборостроительной отрасли, и анализ полученных результатов поможет можно использовать при обработке металлов и сплавов, схожих по твёрдости.

Образцы предварительно обтачивались на токарном станке 16К20 с режимами обработки $S = 0,054$ мм/об, скорость обработки - $V = 20$ м/мин, глубина резания - $t = 0,5$ мм. Формируемая поверхность образцов обладала следующими параметрами: Д16 – $Ra = 1,181$ мкм, $Rz = 5,533$ мкм; Д16Т – $Ra = 0,954$ мкм, $Rz = 5,333$ мкм. УЗПД проводилось на базе токарного станка по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой детали.

Ультразвуковые колебания генерировались с помощью ультразвукового генератора ИЛ10-1.0 и магнитострикционного преобразователя с рабочей частотой 18 кГц. Инденторы были выполнены из синтетических алмазов типа АСПК, с радиусом 4 мм. Параметры обработки варьировались в следующих пределах: $P_{СТ} = 20 \dots 120$ Н; $V = 28 \dots 226$ м/мин. Постоянные параметры: $2A_0 = 20$ мкм; диаметр обрабатываемых образцов $D_{Д16} = 50$ мм, $D_{Д16Т} = 45$ мм.

Профилограммы были получены при помощи профилографа-профилометра модели Mahr Mar Surf PS 10. Фотографии поверхности получены с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT, с увеличением $\times 25$. Определение микротвёрдости проводилось на микротвердомере ПМТ-3М.

Результаты исследований

В работе исследовались зависимости изменения состояния поверхностного слоя деталей, по параметрам шероховатости Ra и Rz , а также микротвёрдости HV, от скорости обработки, статической нагрузки. Данные, полученные после УЗПД, сравнивались с результатами после АВ.

Ниже приведены графики зависимостей изменения параметра Ra обработанных образцов из сплавов Д16 и Д16Т при варьировании параметрами скорости обработки и прилагаемой нагрузки (рис. 7-10). Кривые строились с помощью линии тренда по полученным значениям.

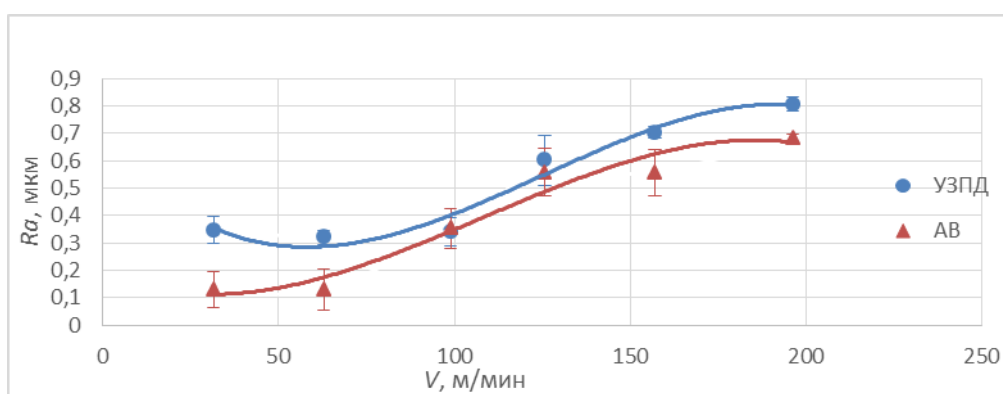


Рисунок 7. Влияние изменения скорости обработки УЗПД и АВ на значение Ra образцов из сплава Д16 (Постоянные параметры обработки: $S = 0,1$ мм/об; $P_{СТ} = 80$ Н)

Из графика на рис. 7 видно, что увеличение скорости обработки (V) при УЗПД до 100 м/мин практически не приводит к увеличению шероховатости по параметру Ra .

Увеличение скорости обработки выше 62 м/мин при алмазном выглаживании, в свою очередь, существенно повышает этот параметр.

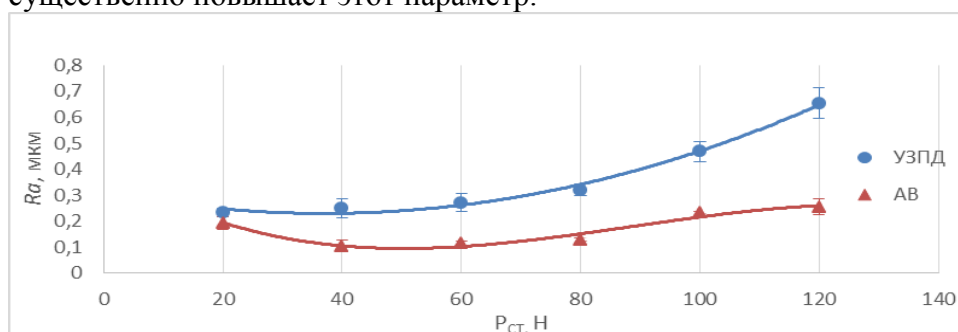


Рисунок 8. Влияние прилагаемой нагрузки при УЗПД и АВ на значение Ra образцов из сплава Д16 (Постоянные параметры обработки: $S = 0,1$ мм/об, $V = 62,8$ м/мин)

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что даже нагрузке в 20 Н достаточно для того, чтобы сгладить исходную шероховатость (в пределах исходной). Увеличение нагрузки выше 60 Н нецелесообразно, так как ведёт к обильному течению материала и росту параметра Ra . Дополнительным выводом из графика является то, что полученные значения шероховатости при УЗПД выше значений, полученных при алмазном выглаживании, за счёт более активного перемещения материала в поверхностном слое.

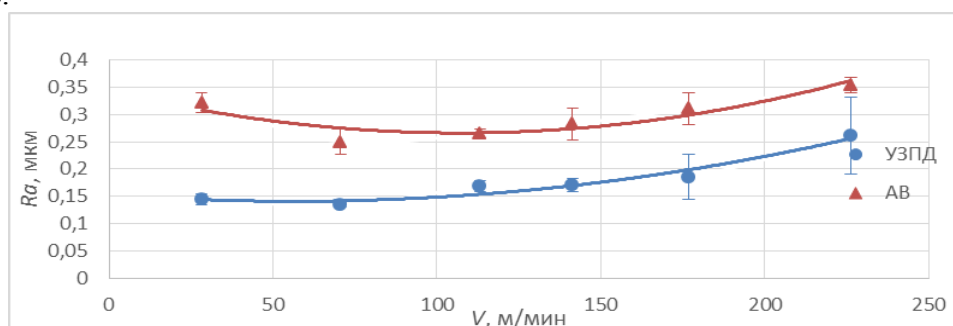


Рисунок 9. Влияние изменения скорости обработки УЗПД и АВ на значение Ra образцов из сплава Д16Т (Постоянные параметры обработки: $S = 0,1$ мм/об; $P_{ст} = 80$ Н).

Результаты, представленные на рисунке 9, говорят о том, что применение скоростей обработки при УЗПД до 175 м/мин позволяют достигать шероховатости поверхности, по параметру Ra на уровне процесса АВ, достигаемого только при V в районе 70 м/мин. Данные особенности позволяют проводить конечный этап обработки с большей производительностью.

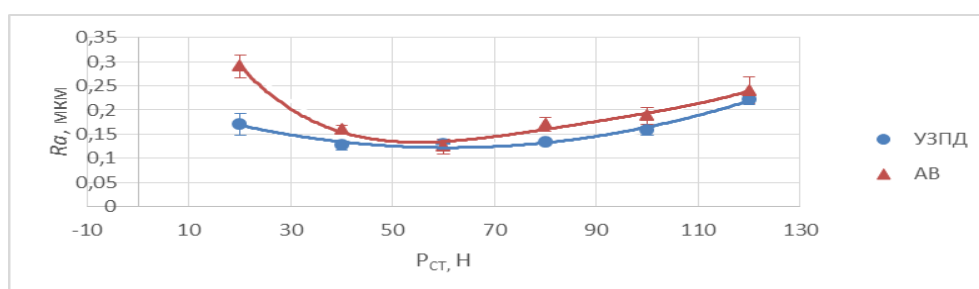


Рисунок 10. Влияние прилагаемой нагрузки при УЗПД и АВ на значение Ra образцов из сплава Д16Т (Постоянные параметры обработки: $S = 0,1$ мм/об, $V = 70$ м/мин).

Исходя из графика (рис. 10) оптимальной нагрузкой при УЗПД сплава Д16Т является её значение в пределах от 40 до 80 Н. Этот факт говорит о том, что обработка данного материала применима в более широком диапазоне, относительно процесса АВ.

Профилограммы поверхностей образцов приведены до и после УЗПД приведены на рис. 11-14.

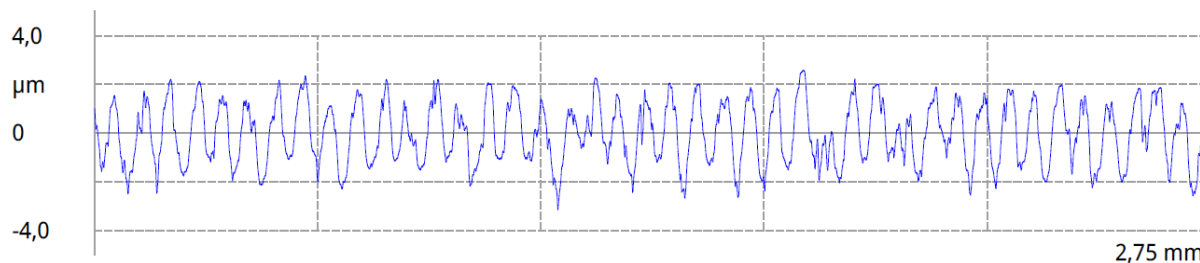


Рисунок 11. Профилограмма исходной поверхности образца из сплава Д16 (вертикальное увеличение 2 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

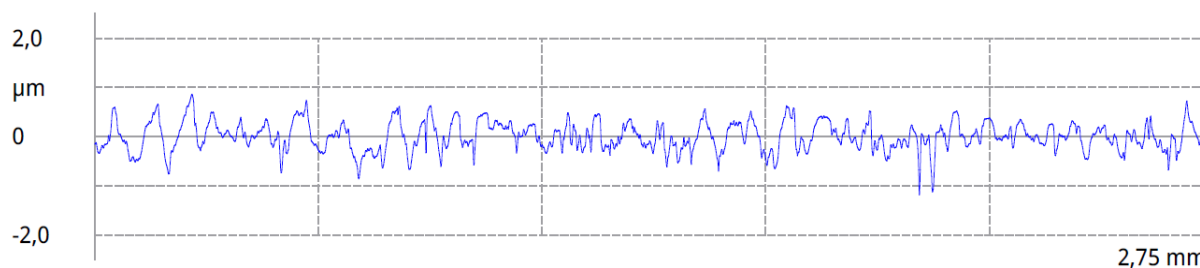


Рисунок 12. Профилограмма поверхности образца из сплава Д16 после УЗПД на режимах: $P_{CT} = 40$ Н, $V = 62,8$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об (вертикальное увеличение 1 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

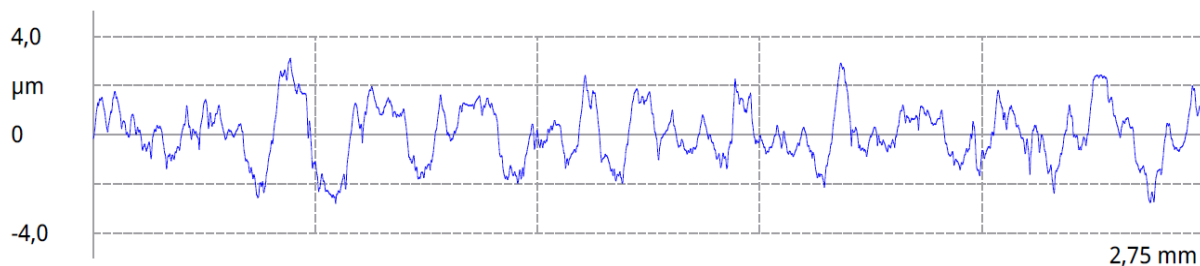


Рисунок 13. Профилограмма исходной поверхности образца из сплава Д16Т (вертикальное увеличение 2 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

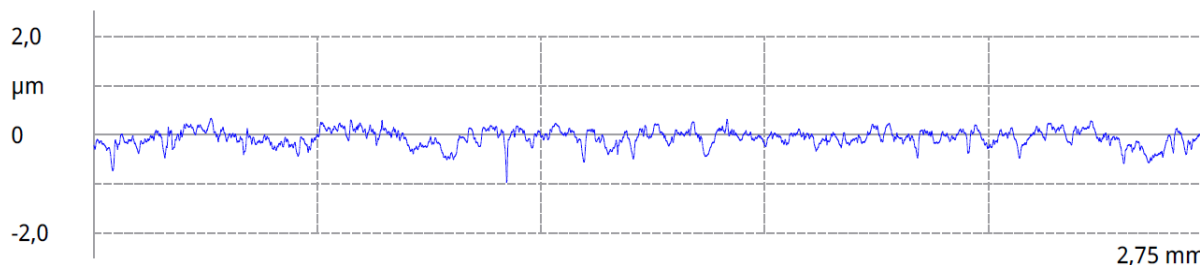


Рисунок 14. Профилограмма поверхности образца из сплава Д16Т после УЗПД на режимах: $P_{CT} = 40$ Н, $V = 70$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об (вертикальное увеличение 1 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

Результаты, приведённые на профилограммах (рис. 11-14) указывают на то, что применение ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по тангенциальной схеме позволяет уменьшать исходную шероховатость поверхности. В случае с обработкой сплава Д16 не наблюдается значительного изменения шаговых параметров (по сравнению с исходным), при уменьшении высоты неровностей. Применение УЗПД при обработке образца из Д16Т, на приведённом режиме, помимо снижения высотных характеристик также существенно изменяет средний шаг микронеровностей.

Особенности строения поверхности после УЗПД и АВ изучались с помощью металлографических исследований.

Результаты оптических исследований приведены на рис. 15.

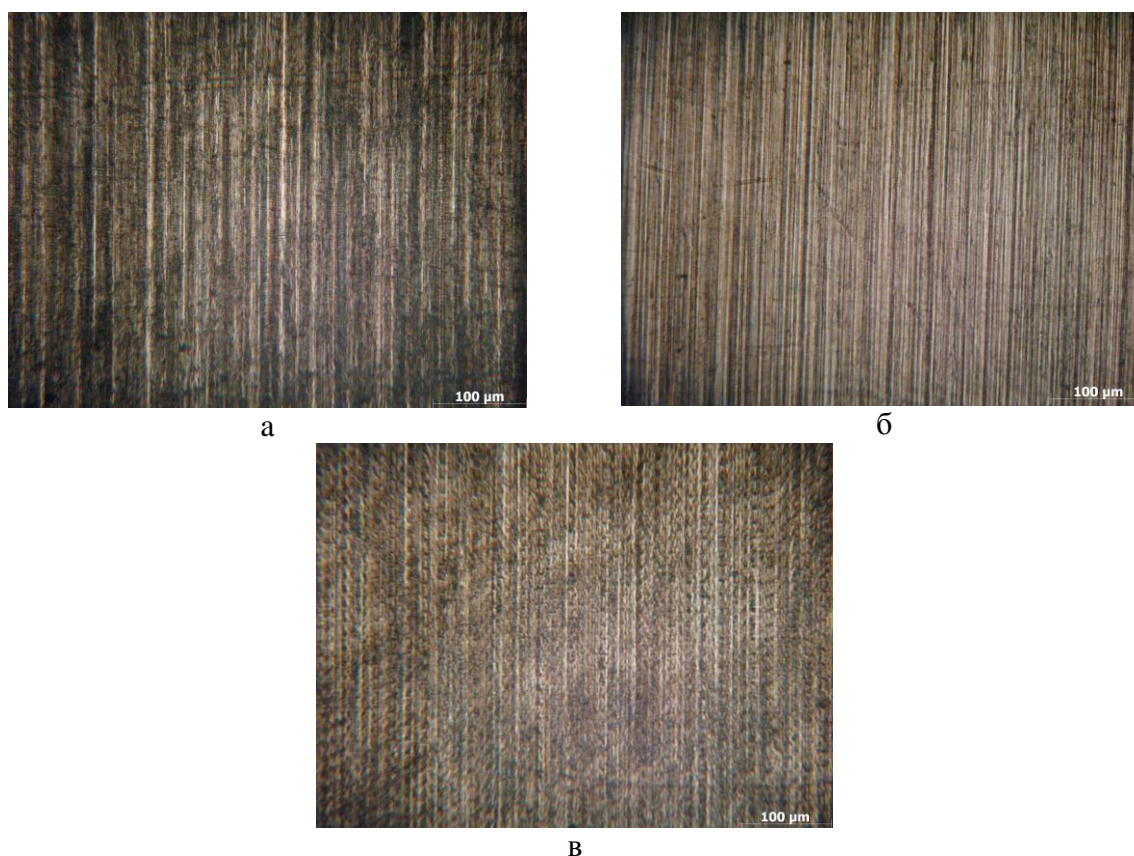


Рисунок 15. Поверхности образцов из Д16Т до и после обработки
а) исходная поверхность; б) АВ ($P_{CT} = 60$ Н, $S = 0,1$ мм/об; $V = 70$ м/мин);
в) УЗПД по касательной схеме ($P_{CT} = 60$ Н, $S = 0,1$ мм/об; $V = 70$ м/мин)

Анализ приведённых фотографий говорит о том, что при обработке как алмазным выглаживанием, так и ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием происходит сглаживание неровностей исходной поверхности. Дополнительно можно отметить тот факт, что применение УЗПД приводит к более полной деформации обрабатываемого слоя и при этом формируется специфичная микрогеометрия, имеющая регулярное ячеистое строение.

Заключение

Применение ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности позволяет

формировать стабильное геометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя, с микрогеометрией, имеющей специфическое регулярное строение и малые значения высотных параметров.

Более полное сглаживание исходного профиля при УЗПД достигается при меньших значениях $P_{СТ}$, по сравнению с АВ.

Минимальные значения шероховатости ($Ra = 0,25$ мкм, $Rz = 1,667$ мкм) для сплава Д16 реализуются на режимах УЗПД - $V =$ от 30 до 100 м/мин, $P_{СТ} =$ от 20 до 60 Н, а для сплава Д16Т ($Ra = 0,126$ мкм, $Rz = 0,94$ мкм) - при $V =$ от 30 до 175 м/мин, $P_{СТ} =$ от 40 до 80 Н.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90059.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Yang Bai, Ming Yang, The influence of superimposed ultrasonic vibration on surface asperities deformation, *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – P. 367-374.
2. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова. – Иваново; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. – 64с.
3. S.Kumar, C.S.Wu, G.K.Padhy, W. Ding. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017. – P. 295-322.
4. X. Yang et al. / *International Journal of Fatigue* 61 (2014). P. 28-38.
5. I. A.Telkov. The Structure of the Surface Roughness, Treated by Surface Plastic Deformation to Facilitate its Calculation, *Procedia Engineering*, 2015. – P. 981-986.
6. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
7. M.-s. Kim, et al. *Journal of Materials Processing Tech.* 277 (2020) 116420.
8. K. Rakhimyanov, V. Gileta and A. Samul. Kinematics of ultrasonic processing, *ICMTMTE 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 971 (2020) 022054 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/971/2/022054.

Поступила в редколлегию 14.03.2021 г.