

Исследование процесса поверхностной ультразвуковой обработки металлов

[Алексей Н. Сливин](#), Виктор А. Нестеров, Сергей С. Хамрителев,

[Сергей С. Хмелёв](#), *Student Member*, IEEE,

Бийский технологический институт

Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия

Аннотация – В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса поверхностной ультразвуковой обработки металлов. Приведены теоретические расчёты оптимальных параметров ультразвукового воздействия для обеспечения необходимой шероховатости. Результаты экспериментальных исследований представлены для процессов обработки внутренних поверхностей образцов из алюминия.

Ключевые слова – Ультразвук, обработка металлов, шероховатость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение ультразвукового воздействия при механической обработке и поверхностном упрочнении является перспективным и прогрессивным направлением в современной технологии, позволяющим повысить производительность обработки, улучшить качество и повысить надежность изделий. Ультразвуковые колебания высокой амплитуды позволяют повысить научно-технический уровень технологических процессов обработки деталей из труднообрабатываемых материалов в машиностроении, а в некоторых случаях, принципиально по-новому, решать технологические проблемы современных производств.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Ультразвуковое воздействие формирует в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения, в результате чего поверхностный слой упрочняется, а шероховатость поверхности уменьшается. Поскольку шероховатость поверхности зависит от параметров ультразвукового воздействия, усилие прижима и продольной подачи обрабатывающего инструмента возникла необходимость в проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса ультразвуковой обработки металлов с целью выявления оптимальных режимов ультразвукового воздействия и условий обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 На основании теоретического анализа выявить особенности процесса пластического деформирования металлов с одновременным воздействием ультразвуковых колебаний;

2 На основании теоретических исследований установить зависимости параметров качества обработки металлов от режимов ультразвукового воздействия и условий реализации процесса;

3 Провести экспериментальные исследования процесса и выявить режимы ультразвукового воздействия, значения продольной подачи, усилие прижима ультразвукового инструмента, для обеспечения наилучшего качества обрабатываемых деталей;

4 В результате экспериментальных исследований влияния ультразвукового воздействия на процесс пластического деформирования установить значения качества обрабатываемой поверхности для подтверждения эффективности ультразвукового воздействия.

III. ТЕОРИЯ.

Возможность повышения качества обрабатываемой детали при ультразвуковой поверхностной пластической деформации связана с импульсным характером ультразвуковых напряжений [1].

Как показали экспериментальные исследования, сила прижима имеет вид периодически повторяющихся импульсов (рисунок 1).

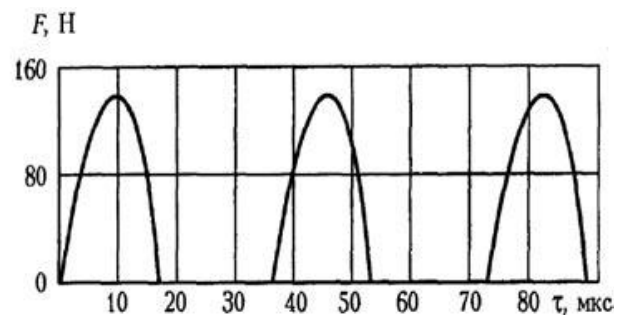


Рис. 1 - Зависимость силы прижима от времени

В интервале между импульсами сила равна нулю, а пиковое значение силы существенно выше среднего усилия постоянного прижима [2].

Для исследования процесса анализируется режим механической обработки, при котором ультразвуковой инструмент прижимается к постоянной силой $F_{\text{пр}}$ к обрабатываемой поверхности.

На рисунке 2 схематично изображена модель поверхностного пластического деформирования ультразвуковым инструментом:

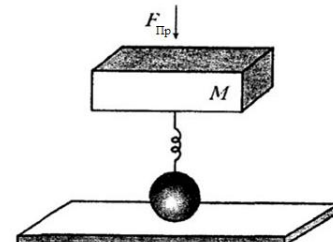


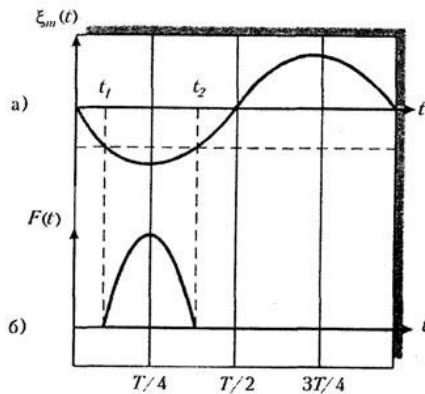
Рис. 2 - Модель поверхностного пластического деформирования ультразвуковым инструментом

Модель предназначена для установления зависимостей между величиной пиковых напряжений при ударном воздействии ультразвукового инструмента и амплитудой колебательных смещений ξ_m при наличии постоянной силы $F_{\text{пр}}$ [2]-[3].

Согласно предложенной модели, к основанию, характеризуемому массой M , прикреплен шарик на пружине. имитирующий воздействие ультразвуковой колебательной системы. В определенные моменты времени шарик касается плоской поверхности, упруго деформирует ее и затем отходит от плоской поверхности; в течение некоторого времени контакта нет.

К системе постоянно приложена сила прижима $F_{\text{пр}}$, равная усредненной за период колебаний силе контактного взаимодействия

Рисунок 3 иллюстрирует движение шарика и действующих сил:



а – изменение местоположения шарика от времени; б – зависимость сил, действующих в процессе его контакта с обрабатываемой поверхностью, от времени; t_1 – момент касания шарика поверхности; t_2 – момент прекращения контакта.

Рис. 3 – Зависимость движения шарика и действующих сил от времени

$$\xi(t) = \xi_m \sin 2\pi ft, \quad (1)$$

где ξ_m – амплитуда колебательных смещений;

f – частота ультразвуковых колебаний.

Глубина внедрения шарика (далее наконечник ультразвукового инструмента) при упругой деформации поверхности:

$$h(t) = \xi_m (\sin 2\pi ft - \sin 2\pi ft_1). \quad (2)$$

Возникающая сила в соответствии с теорией Герца:

$$F = \frac{4}{3} ER_{\text{пр}}^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

причем

$$E = \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}, \quad (4)$$

где E_1 и E_2 модули упругости материалов обрабатываемой детали и наконечника ультразвукового инструмента соответственно;

ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона материалов обрабатываемой детали и наконечника ультразвукового инструмента соответственно;

$R_{\text{пр}}$ – приведенный радиус поверхностей контактирующих тел. Значения приведенного радиуса $R_{\text{пр}}$ не зависят ни от контактной нагрузки, ни от химического состава и физико-механических свойств материала деформируемых тел, а полностью определяются

начальными геометрическими параметрами тел в зоне их контакта.

Выражение, связывающие усилие прижатия ультразвукового инструмента в зависимости от его скорости колебаний, мощности колебательной системы и сопротивления нагрузки [4], [5]:

$$P = \pi f \xi k_T F_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{пр}}$ – сила прижима ультразвукового излучателя к обрабатываемой детали;

k_T – коэффициент, учитывающий особенности колебательной системы, ее потери, характер сопротивления нагрузки и т. п. $k_T = (0,18 \div 0,20)$.

Также мощность системы можно определить выражением:

$$P = \frac{Fh}{t}, \quad (6)$$

где F – сила удара наконечником ультразвукового инструмента об обрабатываемую деталь;

h – глубина вдавливания наконечника ультразвукового инструмента в обрабатываемую деталь;

t – время.

Получено выражение, связывающее глубину вдавливания наконечника ультразвукового инструмента с силой прижима, частотой колебаний, амплитудой и радиусом:

$$h = \left(\frac{\pi ft \xi k_T F_{\text{пр}}}{\frac{4}{3} ER_{\text{пр}}^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (7)$$

В данной формуле $\xi = \xi_m \nu_2$ – амплитуда поперечных колебательных смещений, так как наконечник движется в плоскости обрабатываемой детали.

На рисунке 4 показана зависимость глубины вдавливания наконечника от амплитуды колебательных смещений ультразвукового инструмента:

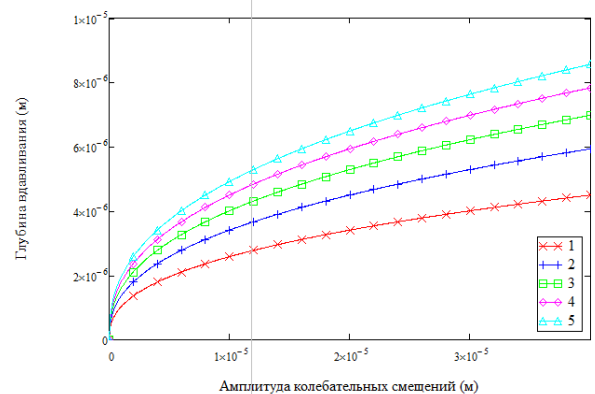


график 1 – $F_{\text{пр}} = 50$ Н; график 2 – $F_{\text{пр}} = 100$ Н; график 3 – $F_{\text{пр}} = 150$ Н; график 4 – $F_{\text{пр}} = 200$ Н; график 5 – $F_{\text{пр}} = 250$ Н.

Рис. 4 – Зависимость глубины вдавливания наконечника ультразвукового инструмента h от амплитуды колебательных смещений ξ_m

На основе представленного графика можно сделать вывод, что максимальная глубина вдавливания наконечника ультразвукового инструмента достигается при максимальной амплитуде.

На рисунке 5 показана зависимость глубины вдавливания наконечника от частоты колебаний f ультразвукового инструмента:

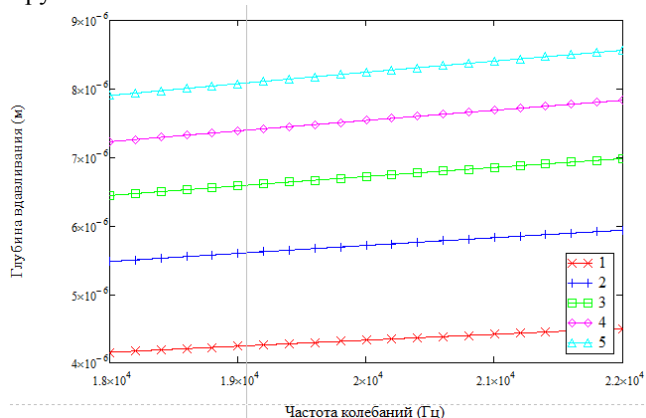


график 1 – $F_{np} = 50$ Н; график 2 – $F_{np} = 100$ Н; график 3 – $F_{np} = 150$ Н; график 4 – $F_{np} = 200$ Н; график 5 – $F_{np} = 250$ Н.

Рис. 5 – Зависимость глубины вдавливания наконечника ультразвукового инструмента h от частоты колебаний f

На основе представленного графика можно сделать вывод, что в интервале от 18 кГц до 22 кГц частота практически не влияет на глубину вдавливания наконечника ультразвукового инструмента.

На рисунке 6 показана зависимость глубины вдавливания наконечника от статической силы прижима ультразвукового инструмента:

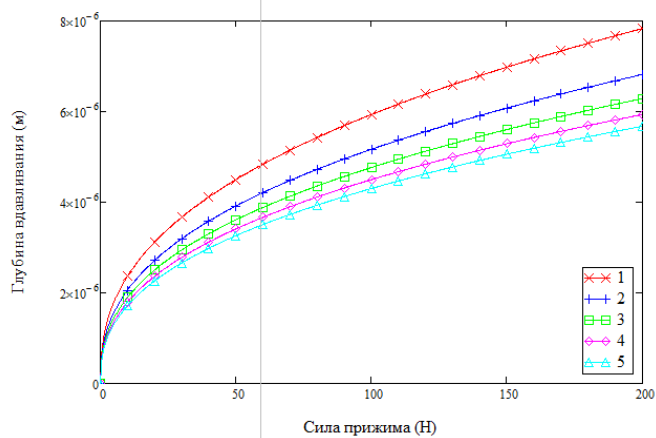
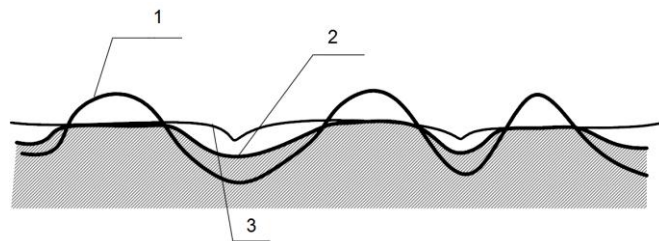


график 1 – $R_{np} = 1 \cdot 10^{-3}$ М; график 2 – $R_{np} = 2 \cdot 10^{-3}$ М; график 3 – $R_{np} = 3 \cdot 10^{-3}$ М; график 4 – $R_{np} = 4 \cdot 10^{-3}$ М; график 5 – $R_{np} = 5 \cdot 10^{-3}$ М.

Рис. 6 – Зависимость глубины вдавливания наконечника ультразвукового инструмента h от статической силы прижима F_{np}

На основании зависимостей, представленных на графике можно сделать вывод о том, что сила прижима существенно влияет на глубину вдавливания наконечника ультразвукового инструмента. Значительное увеличение глубины вдавливания происходит в интервале от 1 до 100 Н.

На рисунке 7 показано образование профиля установившейся шероховатости:



1 – исходная шероховатость; 2 – шероховатость на промежуточном этапе обработки; 3 – установившаяся шероховатость.

Рис. 7 – Образование профиля установившейся шероховатости

На поверхности детали образуется новый специфический микрорельеф, характеризующийся однородностью свойств по всем направлениям. При продолжении процесса обработки он постоянно воспроизводится, а его параметры не будут изменяться в некоторый промежуток времени [6].

Для определения высоты микронеровностей, полученных после ультразвуковой обработки, использована зависимость, связывающие величину подачи, радиус наконечника, начальную высоту неровностей, а также глубину вдавливания наконечника в обрабатываемую деталь [3]:

$$Rz = Rz_0 - h + \left(R - \frac{\sqrt{4R^2 - (S - \xi_m)^2}}{2} \right), \quad (8)$$

где Rz_0 – начальная высота неровностей;
 h – глубина вдавливания наконечника ультразвукового инструмента, определяемая по формуле (7);
 S – продольная подача инструмента;
 R – радиус наконечника ультразвукового инструмента;
 ξ_m – амплитуда колебательных смещений.

На рисунке 8 показана зависимость величины шероховатости от амплитуды колебательных смещений:

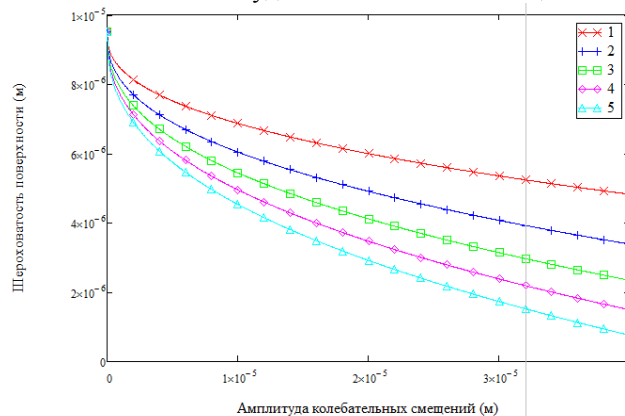


график 1 – $F_{np} = 50$ Н; график 2 – $F_{np} = 100$ Н; график 3 – $F_{np} = 150$ Н; график 4 – $F_{np} = 200$ Н; график 5 – $F_{np} = 250$ Н.

Рис. 8 – Зависимость шероховатости поверхности Rz от амплитуды колебательных смещений ξ_m

Анализ кривых этого графика позволяет сделать вывод, что максимальное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности достигается при максимальной амплитуде колебательных смещений.

На рисунке 9 показана зависимость шероховатости от статической силы прижима ультразвукового инструмента:

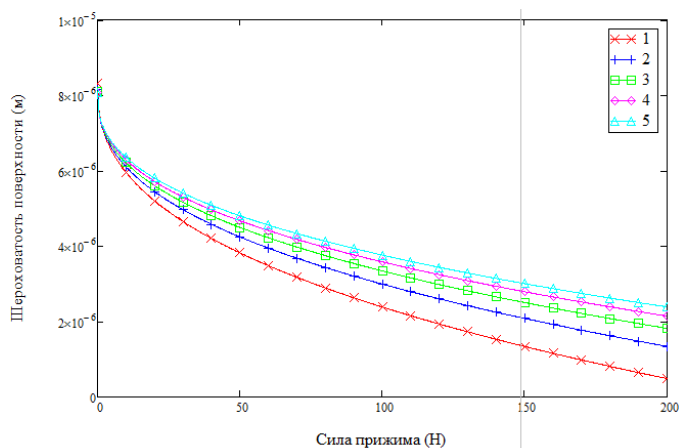


график 1 – $R_{пр} = 1 \cdot 10^{-3}$ м; график 2 – $R_{пр} = 2 \cdot 10^{-3}$ м; график 3 – $R_{пр} = 3 \cdot 10^{-3}$ м; график 4 – $R_{пр} = 4 \cdot 10^{-3}$ м; график 5 – $R_{пр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Рис. 9 – Зависимость шероховатости R_z от статической силы прижима ультразвукового инструмента $F_{пр}$

Из полученных зависимостей следует, что максимальное уменьшение шероховатости поверхности достигается при максимальной силе прижима и минимальном радиусе наконечника ультразвукового инструмента.

При обработке, определенная часть площадки контакта перекрывается последующей.

Чтобы отобразить величину перекрытия можно ввести соответствующий коэффициент K_{II}^S . Коэффициент перекрытия в направлении подачи:

$$K_{II}^S = 1 - \frac{S}{2a}, \quad (9)$$

где S - продольная подача ультразвукового инструмента;
 a - размер малой полуоси эллипса, которая рассчитывается по формуле

$$a = \sqrt{R^2 - (R-h)^2} \quad (10)$$

На рисунке 10 приведены расчетные схемы для определения подачи инструмента.

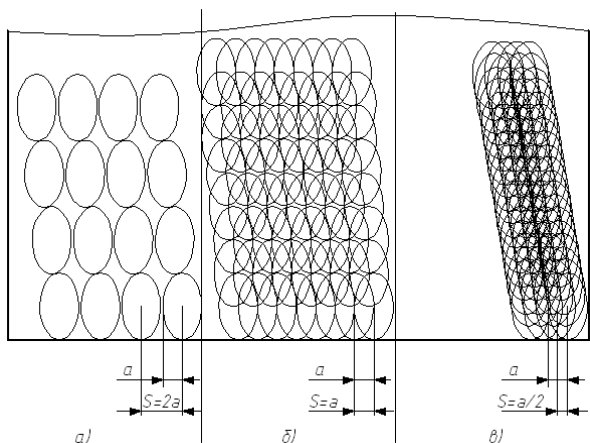


Рис. 10 – Расчетные схемы для определения продольной подачи инструмента при расположении площадок контакта:
 а – без перекрытия;
 б – с перекрытием на половину; в – с перекрытием на три четверти.

Для варианта, представленного на рисунке 10 (а), $K_{II}^S = 0$;
 для варианта на рис. 10(б) $K_{II}^S = 1/2$;
 для варианта на рис. 10 (в) $K_{II}^S = 3/4$.

Расстояние между двумя отпечатками определяется выражением:

$$\Delta = \frac{V}{f}, \quad (11)$$

где V – скорость тангенциального перемещения;

На рисунке 11 показана зависимость шероховатости поверхности от продольной подачи ультразвукового инструмента.

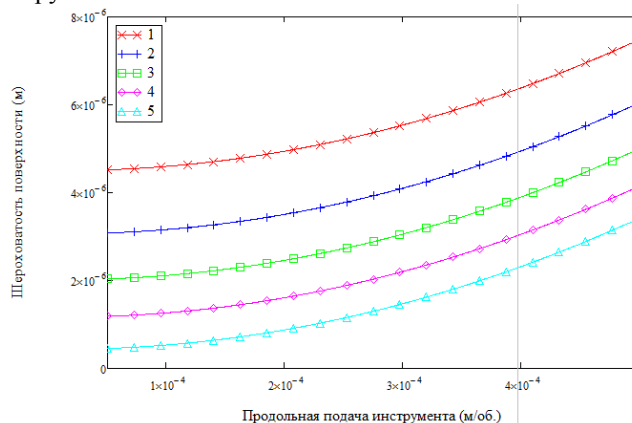


график 1 – $F_{пр} = 50$ Н; график 2 – $F_{пр} = 100$ Н; график 3 – $F_{пр} = 150$ Н; график 4 – $F_{пр} = 200$ Н; график 5 – $F_{пр} = 250$ Н.

Рис. 11 – Зависимость шероховатости поверхности R_z от продольной подачи ультразвукового инструмента S

Из представленных зависимостей следует, что увеличение продольной подачи ведет к ухудшению шероховатости.

Определение оптимальных параметров ультразвукового воздействия

Как следует из проведенного анализа, эффект улучшения шероховатости обрабатываемой поверхности определяется максимальным значением действующих при ударе импульсных напряжений, величина которых зависит от амплитуды колебательных смещений, усилия прижима, частоты ультразвуковых колебаний, продольной подачи ультразвукового инструмента, частоты вращения обрабатываемой детали. Поверхностный слой при ультразвуковой поверхностной обработке в этом случае формируется в результате многократных упругопластических деформаций, повторяющихся с частотой ультразвуковых колебаний [7]-[8].

Из анализа построенных зависимостей следует, что наибольшее влияние на качество обрабатываемой детали оказывает амплитуда колебательных смещений, усилие прижима, а также продольная подача ультразвукового инструмента. Частота ультразвуковых колебаний (18÷22 кГц) не оказывает заметного влияния на процесс пластического деформирования.

Большая продольная подача ультразвукового инструмента в совокупности с малым усилием прижима дают не очень хорошие показатели шероховатости, но высокую

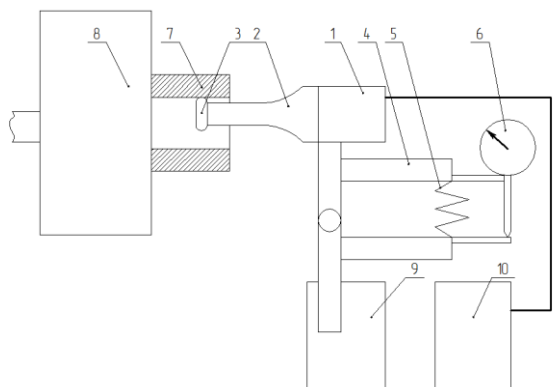
производительность. Напротив, с малой продольной подачей достигаются высокие показатели качества обрабатываемой поверхности, но ухудшается производительность обработки. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что для обеспечения высокой производительности и достаточной по качеству шероховатости поверхности необходимо обеспечить продольную подачу $S=(0.2\div 0.4)$ мм/об. и силу прижима $F_{пр} = (100\div 200)$ Н.

Оценки показывают, что при скорости тангенциального перемещения $v=10 - 100$ м/мин и рабочей частоте $f = 22$ кГц расстояние между соседними отпечатками изменяется в пределах $0,01 - 0,1$ мм. Это означает практически непрерывную обработку поверхности детали.

Поверхностная ультразвуковая обработка металлов позволяет уменьшить высоту микронеровностей и создает в поверхностных слоях благоприятную эпюру остаточных сжимающих напряжений.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

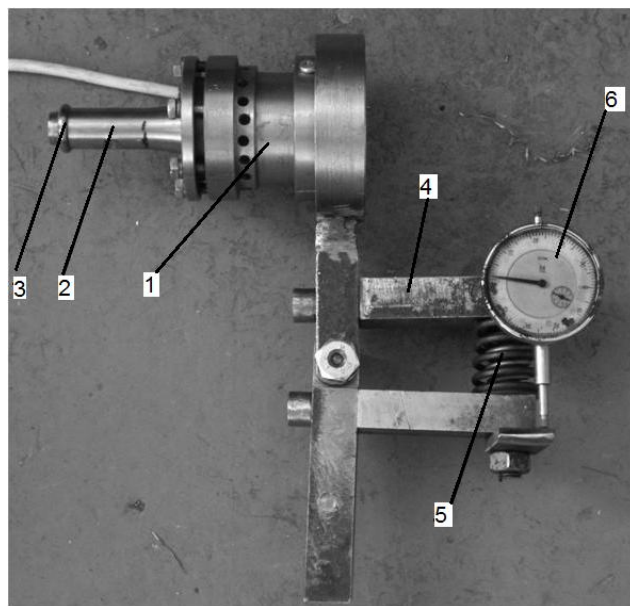
Для экспериментальных исследований процесса ультразвукового пластического деформирования был разработан специальный стенд, схематично показанный на рисунке 12.



1 – излучатель; 2 – концентратор; 3 – наконечник; 4 – кронштейн; 5 – пружина; 6 – индикатор часового типа; 7 – исследуемый образец; 8 – шпиндель токарного станка; 9 – резцедержатель каретки; 10 – ультразвуковой генератор.

Рис. 12 – Схема стенда для экспериментальных исследований ультразвуковой обработки металла

Стенд для проведения исследований был практически реализован для ультразвуковой обработки металла. На рисунке 13 представлена фотография основной части стенда:



1 – излучатель; 2 – концентратор; 3 – наконечник; 4 – кронштейн; 5 – пружина; 6 – индикатор часового типа.
 Рис. 13 – Стенд для ультразвуковой обработки металла

Наконечник при помощи оправки крепится к концентратору, на который поступают ультразвуковые колебания. Материал наконечника – сталь ШХ15, концентратора – ВТ5. Для создания постоянной силы прижатия инструмента к детали используется пружина.

В качестве подвергаемой воздействию в процессе обработки детали выбрана втулка (рисунок 14). Выбор детали обусловлен её доступностью. Материал заготовки – алюминиевый сплав АК12 (Химический состав: кремний 10–13 %, алюминий – основа, примесей, %, не более: железо – 0,20, марганец – 0,03, кальций – 0,04, титан – 0,03, медь – 0,02, цинк – 0,04), изготовлена методом литья под давлением.

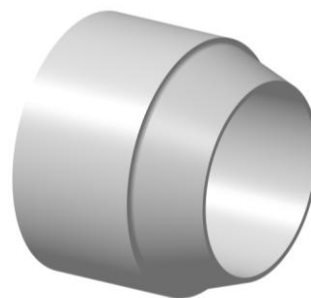


Рис. 14 – Образец для проведения испытаний

В процессе экспериментов варьировались значения основных параметров: амплитуды колебательных смещений инструмента ξ_m , продольной подачи инструмента S и статической силы прижима $F_{пр}$.

В ходе исследований определялось влияние режимов ультразвуковой обработки металла на шероховатость поверхности.

Измерение шероховатости поверхности проводилось на Профилограф-профилометре модели 250.

Прибор предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхностей

изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, и для измерения шероховатости криволинейных поверхностей типа шариков и роликов.

Прибор имеет аналоговый выход на ЭВМ. Вид климатического исполнения УХЛ4.2Х по ГОСТ 15150-69. Условия эксплуатации профилографа-профилометра по ГОСТ 19300-86.

Принцип действия профилографа-профилометра основан на ощупывании неровностей исследуемой поверхности алмазным щупом датчика, воспроизводящим эти неровности и преобразовании, возникающих при этом колебаний щупа, в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям.

Результаты измерений шероховатости приведены на рисунках 15, 16, 17. На рисунке 15 показаны экспериментальные зависимости шероховатости поверхности от статической силы прижима ультразвукового инструмента. Эксперименты проводились с параметрами: продольная подача $S=0.1$ мм/об.; амплитуда колебательных смещений $\xi_m=45$ мкм.

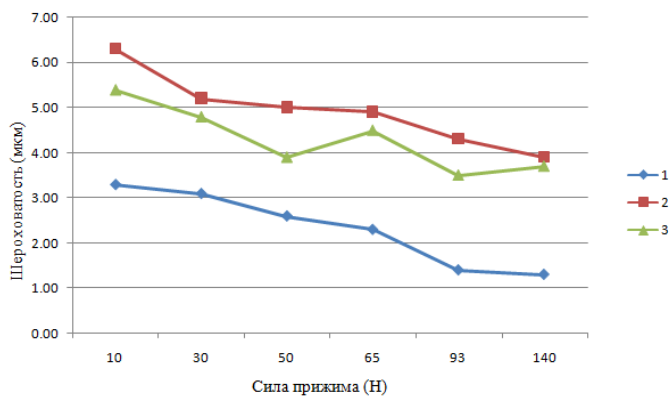


график 1 – $Rz0=3.2$ мкм; график 2 – $Rz0=7.5$ мкм; график 3 – $Rz0=6$ мкм.

Рис. 15 – Экспериментальные зависимости шероховатости Rz от статической силы прижима ультразвукового инструмента $F_{пр}$

Полученные результаты подтверждают что, чем выше сила прижима ультразвукового инструмента к обрабатываемой поверхности, тем меньше шероховатость поверхности после ультразвуковой обработки. Начальная шероховатость поверхности оказывает большое влияние на конечную шероховатость.

На рисунке 16 показаны экспериментальные зависимости шероховатости поверхности от продольной подачи ультразвукового инструмента. Эксперименты проводились с параметрами: амплитуда колебательных смещений $\xi_m=45$ мкм;

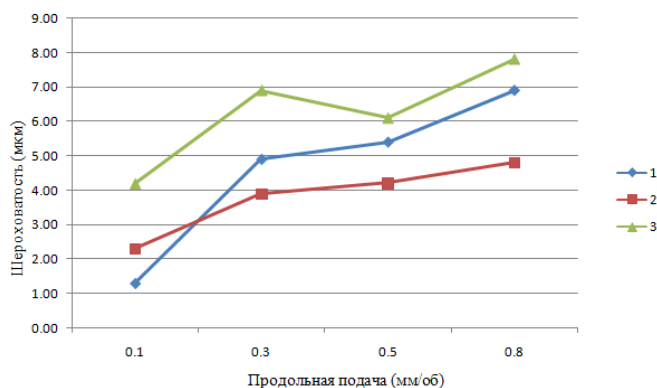


график 1 – $F_{пр}=50$ Н, $Rz0=5.5$ мкм; график 2 – $F_{пр}=93$ Н, $Rz0=6$ мкм; график 3 – $F_{пр}=140$ Н, $Rz0=8.3$ мкм.

Рис. 16 – Экспериментальные зависимости шероховатости Rz от продольной подачи инструмента S

Таким образом, продольная подача ультразвукового инструмента существенно влияет на конечную шероховатость поверхности в диапазоне $S=(0.1\div 0.3)$ мм. Дальнейшее увеличение продольной подачи мало влияет на конечную шероховатость относительно начальной.

На рисунке 17 показаны экспериментальные зависимости шероховатости после ультразвуковой обработки от шероховатости до обработки. Эксперименты проводились с параметрами: продольная подача $S=0.1$ мм/об.; амплитуда колебательных смещений $\xi_m=45$ мкм.

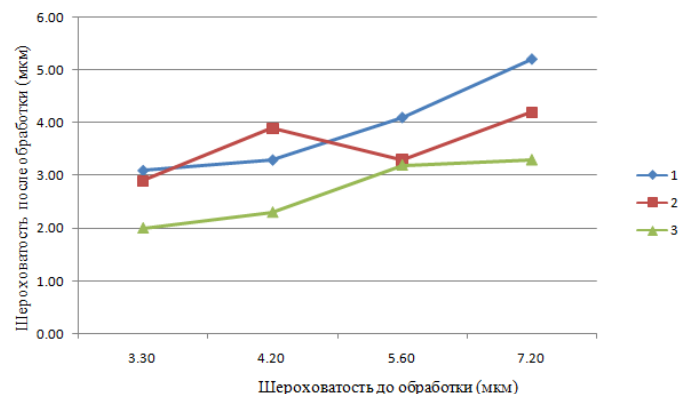


график 1 – $F_{пр}=30$ Н; график 2 – $F_{пр}=50$ Н; график 3 – $F_{пр}=93$ Н.

Рис. 17 – Экспериментальные зависимости шероховатости после ультразвуковой обработки Rz от шероховатости до обработки $Rz0$

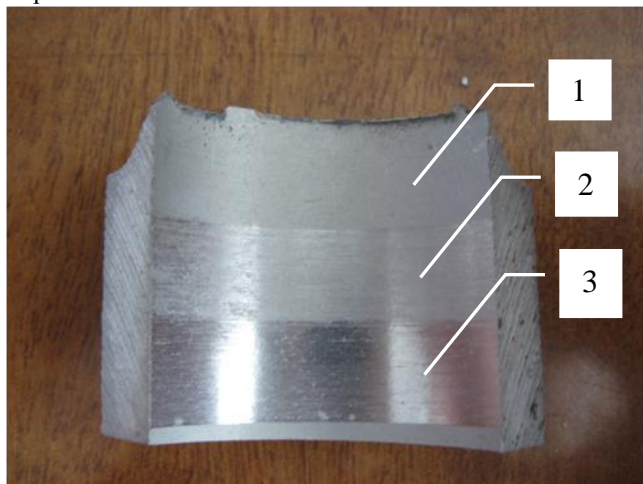
Оценена линейная скорость обработки металла следующим образом. Допустим, что пятно контакта излучателя УЗ имеет длину 0,2 мм. Был задан коэффициент перекрытия точек, равный 10. Тогда при частоте колебаний 22 кГц обеспечивается возможность обработки при линейной скорости 26 м/мин.

Экспериментально было установлено, что диапазон линейной скорости лежит в пределах 20-25 м/мин. При снижении линейной скорости улучшение качества поверхности является незначительным, кроме того, снижается производительность обработки.

При ультразвуковой финишной обработке в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения. Определение величин этих напряжений необходимо для того, чтобы оценить степень упрочнения поверхностного слоя и

выявить, какой уровень внутренних напряжений является критическим, то есть при каких напряжениях происходит усталостное разрушение поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Упрочнение поверхности с помощью ультразвука позволяет сформировать благоприятное распределение остаточных напряжений и микрорельеф поверхности. Анализ полученных результатов показал, что применение ультразвуковой обработки после предварительной операции шлифования снижает высоту микронеровностей с 3,2-6,2 мкм до 1,3-3,7 мкм. На Рисунке 18 представлен распил цилиндрического образца из алюминия с поверхностями



1- До обработки, 2- без ультразвукового воздействия, 3 – с ультразвуковым воздействием.

Рис. 18 – Внешний вид цилиндрического образца из алюминия

Следует учесть, что величина микронеровностей и изменение величины регулируется соответствующими режимами обработки, а также определяются начальной шероховатостью. Ультразвуковая поверхностная обработка в тех случаях, когда не требуется исправления погрешности формы, способна заменить собою процесс шлифования.

При условии, что производительность поверхностной ультразвуковой обработки металлов является доминирующим показателем, например, при серийном производстве деталей, на станке можно установить дубль-каретку и обрабатывать деталь одновременно с резанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Ультразвуковое воздействие характеризуется следующими особенностями и достоинствами:
 - инструмент пластически деформирует поверхностный слой детали импульсно, с большой интенсивностью колебаний, в результате чего формирование сопровождается прерывистым и интенсивным трением;
 - статическая сила, действующая на деталь, незначительна;
 - скорость деформации — переменная, её максимальное значение 200 м/мин и более, что превышает скорость деформирования при ОШ в десятки и сотни раз;
 - в процессе УЗ обработки, вследствие относительно больших напряжений и многократного приложения нагрузки напряжённо-деформированное состояние специфично.
2. Множественное скольжение дополнительно тормозит

дислокацию. Плотность дислокаций намного больше, чем при ОШ. В результате степень наклёпа повышается в 1,2-1,5 раза и соответственно увеличивается уровень остаточных сжимающих напряжений. Применение УЗ обработки может быть эффективно в следующих случаях:

- для деталей термически и химико-термически обработанных сталей У10А, У12, Х40, ШХ 15, сталей аустенитной структуры 12Х18Н9Т и др., где применение других методов не позволяет получить значительный упрочняющий эффект;
- для деталей и инструментов из твердых сплавов;
- для деталей малой и неравномерной жёсткости, так же УЗ обработка характеризуется небольшой статической силой и временем деформирования.

К параметрам режима относится: статическая сила прижима, амплитуда колебаний инструмента, радиус его округления, частота колебаний, продольная подача, скорость обработки детали.

Проведённые сравнительные исследования качества поверхностного слоя деталей после шлифования без ультразвука и после ультразвуковой на оптимальных режимах показали, что наибольший эффект получен на деталях после УЗО. При этом твёрдость увеличилась до 30 %, шероховатость уменьшилась с 3,2-6,2 мкм до 1,3-3,7 мкм. и образуется особый микрорегулярный ячеистый рельеф на поверхности.

Важным преимуществом УЗО является также образование в поверхностном слое наплавленных деталей остаточных напряжений сжатия значительной силы.

Рациональным по качественным и эксплуатационным показателям наплавленных деталей является такой режим, при котором двойная амплитуда УЗК равняется 30...50 мкм, статическое усилие прижима инструмента и детали (30÷150) Н, скорость вращения детали (10÷30) м/мин и продольная подача инструмента (0,1÷0,3) мм/об.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Скобелев, С.Б. Исследование возможности управления геометрическими параметрами обработанной поверхности для определения износостойкости пар трения при ударно-акустической обработке [Текст] / С.Б. Скобелев, В.Б. Масягин // Упрочняющие технологии и покрытия 2008. - №3. - С. 33 - 40.
- [2] Муханов И.И., Голубев Ю.М. Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой [Текст] / Вестник машиностроения. - 1966. - №11. - С. 52 - 53.
- [3] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: [Текст] / Пер. с англ.— М.: Мир, 1989. — 510 с, ил.
- [4] Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] /. — М • Машиностроение, 1980.—237 с. ил. — (Б-ка технолога)
- [5] Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. [Текст] / — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980 — Ил. — 78, табл.— 22, библиогр. — 109 назв. с. 1—280.
- [6] Приходько В.М. и др. Технологическое применение ультразвука в транспортном машиностроении [Текст] / - М.: Издательство «Техполиграфцентр». 2007. - 112 с.
- [7] Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания [Текст] / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
- [8] Ю.В.Холопов. О возможностях безабразивной ультразвуковой финишной обработки металлов // Мир техники и технологий [Текст] /. - 2005. - № 7 - С. 36-39.