

# УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Х. М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,  
 Ю. В. НИКИТИН, канд. техн. наук, доцент,  
 Ю. С. СЕМЕНОВА, ассистент  
 (НГТУ, г. Новосибирск)

Статья поступила 10 февраля 2012 года

Рахимьянов Х.М. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
 Новосибирский государственный технический университет, e-mail: kharis51@mail.ru

Установлен критерий формирования волнистости при обработке материалов различной твердости ультразвуковым пластическим деформированием. Определены области режимных параметров, обеспечивающих формирование волнистости в зависимости от исходной твердости обрабатываемого материала.

**Ключевые слова:** волнистость, микрорельеф, ультразвуковое пластическое деформирование.

## Введение

Применение ультразвукового пластического деформирования (УЗПД) в качестве финишной операции показало свою эффективность при обработке деталей из металлических материалов различной твердости. При УЗПД на поверхности деталей возникает характерный микрорельеф, формирование которого описано в работах [1–3]. Однако, как отмечается многими авторами, при обработке незакаленных материалов, а также цветных металлов и сплавов на поверхности помимо формирования микрорельефа наблюдается также появление волнистости. На рис. 1 представлено изображение обработанной поверхности, где четко различим регулярный микрорельеф в виде дорожек отпечатков индентора, находящихся на расстоянии подачи ( $S = 0,065$  мм/об), и неровности в виде волн пластического течения обрабатываемого материала, располагающихся под некоторым углом  $\alpha$  относительно направления формирования дорожек микрорельефа.

Представленные на рис. 1 геометрические параметры волнистости определены в модели формирования волнистости при ультразвуковом пластическом деформировании, описанной в работе [4]. Однако причины появления наряду с характерным для УЗПД микрорельефом неров-

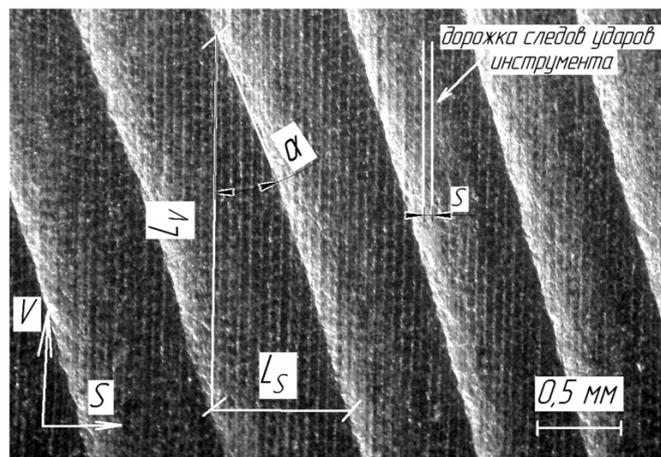


Рис. 1. Геометрические параметры волнистости поверхности после УЗПД детали (сталь 45). Режимы обработки:  $2A = 25$  мкм;  $f = 22,4$  кГц;  $F_{ст} = 150$  Н;  $n = 936$  об/мин;  $S = 0,065$  мм/об;  $D_{дет} = 41$  мм

ностей, относящихся по классификации к волнистости, остались нераскрыты.

На рис. 2 изображена схема накопления волны пластического течения материала при движении инструмента вдоль первого витка при обработке по токарной схеме. Согласно схеме гребень волны формируется за счет сдвига наплыва (материала, вытесненного инструментом), образованного вокруг предыдущего отпечатка при взаимном пере-

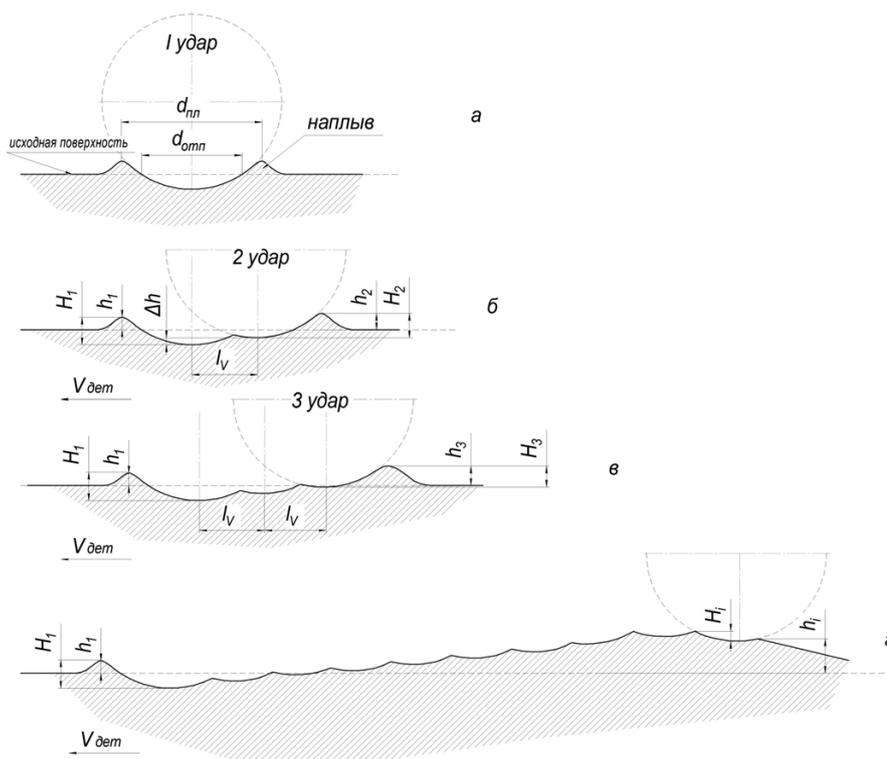


Рис. 2. Накопление волны пластического течения материала в направлении  $V$

мещении инструмента и детали и дальнейшего слияния с вновь образуемым наплывом при последующем ударе (рис. 2, а) в условиях дробного деформационного воздействия. При этом каждый последующий отпечаток будет находиться выше предыдущего на величину  $\Delta h_i$  за счет изменения уровня поверхности деформируемого участка и упрочнения сдвигаемого материала.

Постепенно упрочняясь при сдвиге, материал все больше сопротивляется деформации, в результате чего наступает момент, когда инструмент перестает сдвигать сформированный впереди себя наплыв и начинает спускаться по нему до исходного уровня поверхности. Полностью закончив цикл формирования одного гребня волны, инструмент, перемещаясь вдоль витка при токарной схеме обработки, начинает формировать следующий гребень. Этот цикл продолжается в течение одного оборота детали. При переходе инструмента на следующий виток инструмент контактирует уже не только с исходной поверхностью, но и с частью гребня, сформированного на предыдущем витке. В результате совокупный гребень волны пластического течения материала формируется как при перемещении инструмента вдоль витка (в направлении  $V$ ), так и при переходе от витка к витку (в направлении  $S$ ).

Такой механизм формирования гребня волны обеспечивается за счет дробного воздействия ультразвукового инструмента на обрабатываемую поверхность и его способности отслеживать геометрию поверхности благодаря упругой схеме поджатия инструмента к детали.

Условие зарождения и развития волны пластического течения определяется размерами наплыва, образованного вокруг единичного отпечатка (рис. 2, а). В случае, если последующий удар будет приходиться на область наплыва (рис. 2, б), его материал будет вытесняться в область перед инструментом, постепенно накапливаясь от удара к удару. Процесс накопления происходит до тех пор, пока не прекратится прирост высоты волны пластического течения в результате упрочнения, и инструмент не начнет спускаться по сформированному впереди себя наплыву до исходного уровня поверхности. Этот цикл повторяется несколько раз в течение одного оборота детали.

В противном случае – когда расстояние между соседними ударами инструмента в направлении  $V$  будет превышать максимально допустимое – накопления гребня в результате сдвига наплыва не произойдет.

## Математическое моделирование процесса формирования волнистости

Из рассмотренного механизма формирования волны пластического течения следует, что образование первичной волны при движении инструмента в направлении  $V$  на первом витке произойдет лишь в том случае, когда расстояние между соседними отпечатками в направлении движения инструмента вдоль витка не будет превышать половины  $d_{\text{пл}}$  (рис. 2).

Аналогичное ограничение расстояния между соседними отпечатками в направлении подачи  $S$  определялось экспериментально, поскольку математически достаточно сложно описать процесс накопления волны в этом направлении. При переходе инструмента от витка к витку волна пластического течения будет формироваться аналогично волне на предыдущем витке, несколько изменяясь в результате наложения на рельеф, созданный при движении инструмента вдоль предыдущего витка.

В диапазоне применяемых при УЗПД величинах подачи  $S = 0,05 \dots 0,2$  мм/об и возможных величинах диаметра пластического отпечатка  $d_{\text{пл}} = 0,3 \dots 1$  мм волнистость образовывалась при отношении величины диаметра пластического отпечатка к величине подачи от 5 до 8. Для обеспечения стабильного формирования волнистости коэффициент перекрытия в направлении  $S$  был принят равным  $S \leq 0,1 d_{\text{пл}}$ .

Таким образом, формирование волнистости обусловлено двумя ограничениями: расстояние между соседними отпечатками в направлении скорости обработки ( $l_V$ ) не должно превышать половины диаметра пластического отпечатка, и расстояние между соседними ударами инструмента в направлении подачи ( $l_S$ ), а следовательно, между соседними витками, не должно превышать  $0,1 d_{\text{пл}}$ . Принимая во внимание зависимость величины  $l_V$  от режимных параметров

$$l_V = \frac{V}{60f}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость вращения детали, м/мин;  $f$  – частота ультразвуковых колебаний инструмента, Гц, условие формирования волнистости можно представить в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} V \leq \frac{d_{\text{пл}}}{2 \cdot 60f}, \\ S \leq \frac{d_{\text{пл}}}{10}. \end{cases} \quad (2)$$

Следует принять во внимание, что расчет диаметра пластического отпечатка  $d_{\text{пл}}$  в зависимости от условий обработки при моделировании представляется достаточно сложной задачей. Однако необходимо отметить, что известен расчет диаметра отпечатка без учета наплыва, формируемого при УЗПД. В соответствии с деформационной моделью, описанной в работе [1], диаметр отпечатка  $d_{\text{отп}}$  (рис. 2) без учета наплыва вокруг него металла в процессе ультразвукового пластического деформирования будет определяться следующим образом:

$$d_{\text{отп}} = \int_{t_0}^{t_1} 2\sqrt{D_c h_1(t)} dt - \left( h_{\text{max}} - \int_{t_1}^{t_2} 2\sqrt{D_c h_2(t)} dt \right), \quad (3)$$

где  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$  – закономерности, описывающие изменение глубины внедрения инструмента в течение соответствующей фазы (внедрения инструмента и выхода инструмента из контакта);  $D_c$  – диаметр сферического индентора;  $h_{\text{max}}$  – максимальная глубина внедрения индентора;  $t_0$  – момент времени, в который происходит соприкосновение деформирующего элемента с поверхностью детали;  $t_1$  – момент времени максимального внедрения;  $t_2$  – момент выхода деформирующего инструмента из контакта с обрабатываемой поверхностью. Моменты времени  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$  определены в работе [1].

Соотношение  $d_{\text{пл}}$  и  $d_{\text{отп}}$  было установлено с помощью экспериментальных исследований. В ходе эксперимента на поверхность образцов из стали 45 в состоянии поставки (НВ 2000 МПа) наносились единичные отпечатки при определенных деформационных режимах, после чего измерялся диаметр реального отпечатка с наплывом  $d_{\text{пл}}$  и сравнивался с расчетным диаметром  $d_{\text{отп}}$ . Взаимосвязь диаметров  $d_{\text{отп}}$  и  $d_{\text{пл}}$  представлена следующим образом:

$$d_{\text{пл}} = 3,5991 d_{\text{отп}}^{0,5476}. \quad (4)$$



где  $V$  – скорость обработки;  $S$  – подача;  $A$  – амплитуда ультразвуковых колебаний;  $\omega$  – круговая частота ультразвуковых колебаний;  $q = \pi HВ \cdot D_c / \omega r c P$ ;  $\rho$  – плотность материала волновода;  $c$  – скорость распространения продольных звуковых волн;  $P$  – площадь поперечного сечения волновода;  $\varphi_1 = \varphi_0 + \arctg q$ ;  $\varphi_0$  – угол траектории инструмента, соответствующий моменту времени начала деформирования ( $t_0$ );  $\varphi_2 = \varphi_1 + \arctg(q/R)$ ;

$$R = \left( \frac{D_c \cdot 10^{-3}}{2h_{\max}} \right)^{1/3} \left[ \frac{3\pi(1-\mu^2)HD}{E} \right]^{2/3} - \text{коэффициент}$$

упругого восстановления, здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга обрабатываемого материала;  $HD$  – динамическая твердость обрабатываемого материала;  $HD = HВ \cdot k$  ( $HВ$  – твердость материала,  $k = 1,5 \dots 2,25$  [5]).

### Результаты и обсуждение

В результате анализа полученной системы неравенств были установлены области кинематических параметров обработки, обеспечивающих формирование волнистости или ее отсутствие в зависимости от твердости обрабатываемого материала.

Так, на рис. 3 показаны кривые, определяющие критическую скорость обработки детали, которая при прочих равных условиях обеспечивает появление волнистости (значения ниже линии на графике) или его отсутствие (бóльшие значения).

Изменение диаметра пластического отпечатка с напылом в зависимости от твердости ма-

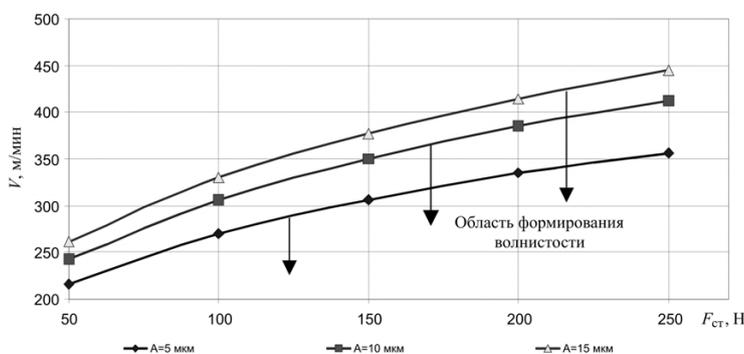


Рис. 3. Зависимость критической скорости обработки от прикладываемого статического усилия ( $HВ$  2000 МПа,  $D = 10$  мм,  $f = 20$  кГц)

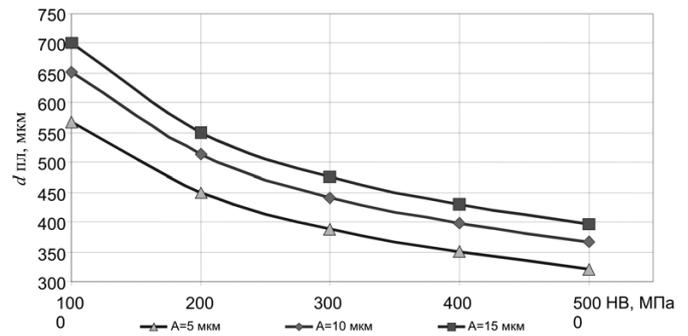


Рис. 4. Изменение диаметра отпечатка с напылом в зависимости от твердости материала ( $F_{ст} = 100$  Н,  $D_c = 10$  мм,  $f = 20$  кГц)

териала и амплитуды колебаний ультразвукового инструмента описывает график, изображенный на рис. 4. Из рисунка видно, что диаметр отпечатка при одних и тех же режимах обработки для материалов разной твердости может изменяться в 1,5 и более раза. При этом критическая скорость, которая прямо пропорциональна диаметру  $d_{пл}$ , изменится во столько же раз.

Рекомендуемые при ультразвуковом пластическом деформировании скорости обработки для обеспечения максимального прироста твердости [3, 4] лежат ниже критических скоростей, указанных на графике (рис. 4) для материалов с твердостью 2000 МПа, поэтому при обработке пластичных материалов с рекомендуемыми режимами появление волнистости весьма вероятно.

Взаимосвязь режимных параметров обработки и критического значения подачи на формирование волнистости показана на рис. 5. Из рисунка видно, что волнистость при обработке материалов с твердостью 2000 МПа перестает формироваться при величине подачи свыше 0,1 мм/об и амплитуде ультразвуковых колебаний до 15 мкм. Увеличение подачи до 0,1 мм/об по сравнению с увеличением скорости до 400 м/мин и выше технологически наиболее осуществимо. Следует отметить, что при обработке более твердых материалов ( $HВ > 3000$  МПа) для появления волн пластического течения необходимы малые подачи. При обработке материалов с твердостью выше 3000 МПа на подачах свыше 0,07...0,1 мм/об волнистость перестает формироваться.

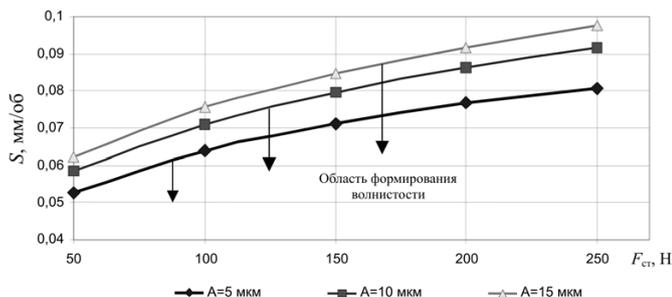


Рис. 5. Влияние статического усилия на величину критического значения подачи (НВ 2000 МПа,  $D_c = 10$  мм,  $f = 20$  кГц)

Формирование рельефа без волнообразования путем изменения подачи является наиболее удобным способом, так как перекрытие соседних дорожек обеспечивается при режимах, гарантирующих получение рельефа без волн.

### Выводы

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложен критерий, устанавливающий условия формирования волнистости при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. Условия записываются в виде соотношений деформационных параметров процесса (усилие деформирования, диаметр деформатора, амплитуда ультразвуковых колебаний, твердость материала, время контактирования) и кинематических (подача, число

оборотов шпинделя, диаметр обработки, частота ультразвуковых колебаний). На основании анализа полученной системы неравенств определены области режимных параметров обработки материалов различной твердости, обеспечивающие формирование волнистости.

### Список литературы

1. *Высокоэнергетические* процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, Х.М. Рахимьянов и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18).
2. *Технологические* процессы поверхностного пластического деформирования: монография / под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 404 с.
3. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 2. – С. 3–9.
4. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3. – С. 11–17.
5. Дрозд М.С. Глубина наклепанного слоя при дробеструйной обработке деталей // Вестник машиностроения. – 1955. – № 5. – С. 48–50.

### The condition of waviness forming at ultrasonic impact treatment of metals

Kh. M. Rakhimyanov, Yu. V. Nikitin, Y. S. Semenova,

The criterion of waviness forming was deduced in condition of ultrasonic impact treatment of materials with different hardness. Processing conditions zones providing waviness forming was determined depending on material hardness.

**Key words:** waviness, microrelief, ultrasonic impact treatment