

ОБ АВТОРЕЗОНАНСНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

©Владимир Константинович Асташев¹, ©Николай Алексеевич Андрианов¹,

©Виталий Львович Крупенин^{1,2}

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия

²Московский Политехнический Университет, Москва, Россия

krupeninster@gmail.com

Аннотация. Технологии, основанные на использовании ультразвуковых колебаний для интенсификации процессов, получили широкое признание. Это приводит к разработке новых машин и технологий с улучшенными характеристиками. В статье представлены результаты, основанные на методах обработки некоторых материалов с использованием авторезонансных принципов. После ультразвуковой обработки материалов, в приповерхностных зонах образуются наноструктурированные слои, которые отвечают за микромеханические характеристик материала. Разработанная технология позволяет обеспечить обработку различных труднообрабатываемых материалов и получать поверхности с улучшенными геометрическими и механическими свойствами. При этом сама технология обеспечивает минимумы энерго- и материалозатрат. В данной статье представлены результаты анализа структуры компонентов поверхностных слоев, подвергнутых ультразвуковой токарной обработке с использованием авторезонансных устройств. Представленные фотографии демонстрируют формирование наноструктур в тонких поверхностных слоях обработанных образцов. Показано, что ультразвуковая авторезонансная обработка приводит к упрочнению поверхностных слоев. В настоящее время существуют некоторые новые устройства для виброрезания и выглаживания материалов, таких как титановые сплавы, жаропрочные стали, керамика, различные виды стекла, чугун и другие. Кроме того, благодаря целенаправленной обработке приповерхностных слоев материалов, где и формируются системы наноструктур, количество промежуточных операций уменьшается, а таких как, например, шлифовка и полировка, могут оказаться исключенными из технологических процессов, что, как следствие, снижает себестоимость производства.

Ключевые слова: авторезонанс, ультразвук, обработка материалов, эффективность, профиль поверхности, семейство устройств.

ON AUTORESONANT ULTRASONIC CUTTING MATERIALS

©Vladimir K. Astashev¹, ©Nikolay A. Andiranov¹, ©Vitaly L. Krupenin^{1,2}

¹IMASH RAN, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

krupeninster@gmail.com

Abstract. Technologies that use ultrasonic vibration to intensify processes are gaining wide recognition in scientific and industrial environments. By superimposing high frequency vibration, the basic mechanical behaviour of many processes and materials is seen to be transformed. This leads to the development of new machines and processes with advanced characteristics. Important results of processing some materials with autoresonance ultrasonic nano-turning are presented there.

Keywords: autoresonance, ultrasonic, material handling, efficiency, surface profile, a family of devices.

1. Введение. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что наложение ультразвуковых колебаний приводит к существенному снижению статических сил, необходимых для проведения технологического процесса. Эти эффекты получили объяснение [1, 2] на основе анализа нелинейных реологических моделей технологических процессов.

Наряду с этим в работах [3-5] показано, что обработка поверхностей методами ультразвукового пластического деформирования, улучшая качество поверхности, создает наноструктурированный поверхностный слой с такими улучшенными механическими характеристиками, как предел текучести, предел прочности и твердость поверхности.

Однако, следует отметить, что получение стабильных и предсказуемых результатов ультразвуковой обработки возможно лишь при реализации наиболее эффективных резонансных режимов в условиях меняющейся технологической нагрузки на ультразвуковую систему со стороны обрабатываемого изделия. Возникающие при этом трудности обусловлены нелинейностью технологической нагрузки, вызывающей специфические искажения амплитудно-частотных характеристик колебательной системы [6-8] переходом к автоколебательной схеме возбуждения, реализуемой введением контура положительной обратной связи, который осуществляет формирование вынуждающего воздействия путем нелинейного преобразования сигнала, пропорционального движению рабочего органа машины. При определенной настройке, называемой авторезонансной, при любых изменениях параметров колебательной системы и технологической нагрузки устанавливается режим автоколебаний с максимально возможной амплитудой, т.е. в системе автоматически поддерживается наиболее эффективное резонансное состояние [9].

Использование авторезонансных систем, благодаря высокой стабильности рабочих режимов, открывает новые широкие возможности ультразвуковых технологий, которые с полным правом можно назвать авторезонансными [10, 11]. В данном Приложении дается описание результатов авторезонансной ультразвуковой обработки (АРУЗО) различных материалов и проводится систематизация возможностей этой технологии [8-16].

2. Авторезонансное устройство. Рассмотрим авторезонансное устройство для ультразвукового резания (токарной обработки). Оно предназначено для снижения сил резания, точения труднообрабатываемых материалов, повышения чистоты и качества поверхности обрабатываемых изделий, а также получения наноструктурированной поверхности при обработке деталей на токарных станках.

Основные потребители устройства - предприятия, производственная деятельность которых связана с использованием различных токарных станков при получении высокого качества поверхности обрабатываемых изделий.

На рис. 1 приведена схема устройства [9]: 1 — обрабатываемое изделие; 2 — резец; 3 — волновод-концентратор, передающий колебания от пьезокерамических элементов 4 резцу. Концентратор закреплен в корпусе 5, который с помощью кронштейна 6 устанавливается в резцедержателе 7 токарного станка. Питание пьезокерамических элементов производится через цепь обратной связи, содержащей датчик 8, регистрирующий колебания одного из элементов колебательной системы, фазовращатель Φ и нелинейный усилитель 9.

При достаточно большом коэффициенте усиления на начальном участке характеристики усилителя происходит самовозбуждение колебаний, а уровень ограничения выходного напряжения определяет амплитуду установившихся колебаний.

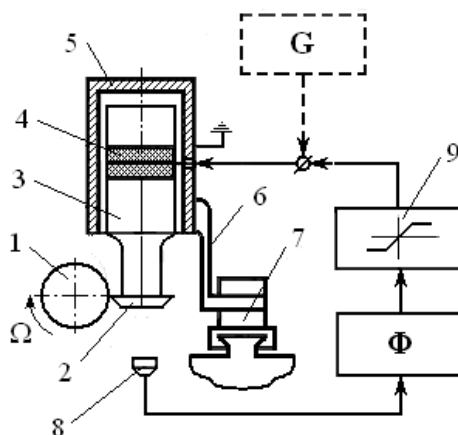


Рис. 1

При определенной фазе сигнала обратной связи, устанавливаемой фазовращателем Φ , возбуждаются резонансные колебания, частота которых зависит, в частности, и от технологической нагрузки. Если фазовый сдвиг выбран так, что разность фаз между колебаниями резца и создаваемой вибровозбудителем силой возбуждения соответствует резонансной, то устройство обеспечит реализацию резонансных колебаний при изменении технологической нагрузки и параметров колебательной системы в широких пределах. Именно такая система возбуждения колебаний с резонансной настройкой фазы в цепи обратной связи и является авторезонансной.

В традиционных ультразвуковых технологических системах питание осуществляется от генератора G с независимым возбуждением, показанного на рис. 1 штриховыми линиями. В этом случае ультразвуковая система даже при наличии подстраивающих внутренних обратных связей в генераторе работоспособна лишь при малых технологических нагрузках, не вызывающих появления неустойчивых ветвей резонансных кривых.

Следует отметить важную особенность такой системы возбуждения колебаний. Она заключается в том, что изменением фазы обратной связи можно реализовать всю амплитудно-частотную характеристику нелинейной колебательной системы, в том числе и нереализуемые при вынужденных колебаниях неустойчивые ветви. Поэтому в авторезонансной системе не происходит срывов амплитуд колебаний при отклонениях фазы и частоты колебаний от резонансных. Отмеченная особенность делает авторезонансную систему устойчивой по отношению к значительным изменениям параметров машины и нелинейной технологической нагрузки, что существенно расширяет технологические возможности ультразвуковой системы.

Работа авторезонансного устройства показала, что его эксплуатация не требует наличия специальных знаний или навыков. Оно стандартным образом устанавливается, например, в резцедержатель токарного станка, резец подводится к обрабатываемому изделию, и обработка изделия при включенном устройстве ничем не отличается от традиционной. Естественно, такие устройства можно устанавливать и на станки с ЧПУ без каких-либо изменений конструкции станка. Работа проводится при скорости резания 60- 80 м/мин и глубине до 2 мм. На рис. 2. Показано семейство устройств, обеспечивающих различные типы АРУЗО: здесь показаны ультразвуковые генераторы и семейство сменных приспособлений, позволяющих проводить обработку изделий (резание и выглаживание) на различных типах станочного оборудования.



Рис. 2

3. Динамические эффекты. Рассмотрим некоторые динамические и технологические эффекты, наблюдаемые при использовании устройств для АРУЗО.

Снижение сил резания имеет место при точении практически всех конструкционных металлов: алюминия, меди, бронзы, латуни; углеродистых, нержавеющей и жаропрочных сталей, титана и др. При ультразвуковом резании снижение сил резания происходит при скоростях резания $v < a\omega$, где a, ω — амплитуда и частота ультразвуковых колебаний инструмента. Причем снижение тем больше, чем больше разница значений в указанном неравенстве.

Причина уменьшения силы резания заключается в изменении характера процесса резания. Ультразвуковое резание представляет собой периодический с частотой ω виброударный процесс [6-7], в котором взаимодействие резца и детали сопровождается периодическими разрывами контакта резца и обрабатываемого изделия. При этом амплитуда возникающих импульсных сил равна величине силы традиционного резания, а длительность импульсов зависит от соотношения скорости резания v и амплитуды $a\omega$ вибрационной скорости резца. Измеряемая в экспериментах сила резания - это среднее за период значение импульсных сил. Вследствие снижения силы резания с помощью авторезонансного ультразвукового резания можно обрабатывать технологически нежесткие изделия без применения промежуточных опор, люнетов и других дополнительных станочных приспособлений.

Ультразвуковая вибрация инструмента полностью исключает возможность возбуждения автоколебаний при резании, которые являются одной из главных причин ухудшения качества поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов.

Ультразвуковая вибрация существенно изменяет характер снимаемой стружки. Даже при обработке материалов, обычное точение которых сопровождается образованием ломкой стружки, при ультразвуковом резании образуется сливная пластичная стружка без заусенцев и неровностей.

На рис. 3 показаны фотографии стружки в процессе традиционного (а) и авторезонансного ультразвукового точения (б) стальной заготовки.

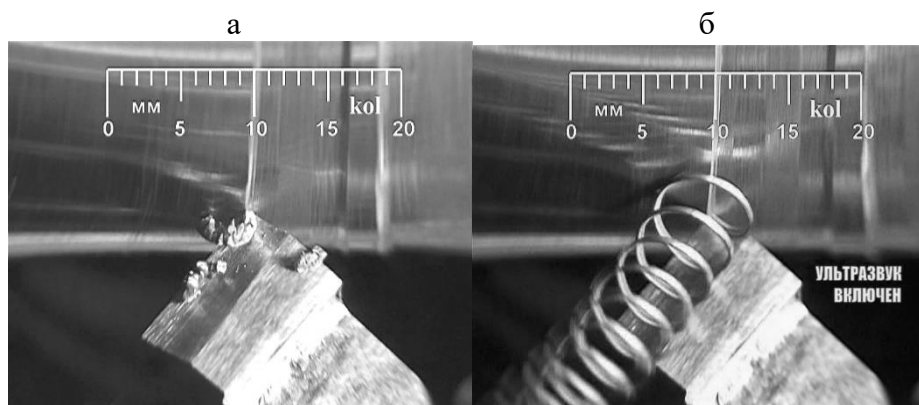


Рис.3

Видно, что при традиционном точении образуется дробленая, элементная стружка с ярко выраженными следами поверхностей сдвига и характерными зубцами. При ультразвуковом точении образуется винтовая гладкая непрерывная стружка.

Стружка при ультразвуковом точении сходит существенно менее нагретой и пластичной, в то время как при традиционном точении она имеет цвета побежалости и оказывается хрупкой. Видимо поэтому наложение ультразвука позволяет существенно уменьшить величину минимально возможного срезаемого слоя. Так при обработке углеродистой и нержавеющей сталей удалось провести точение с подачей 0,05 мм/об и глубиной резания 0,015 мм.

Изменение характера процесса резания сказывается еще и в том, что наложение ультразвуковых колебаний полностью исключает явление образования наростов материала на гранях резца, что особенно важно при точении пластичных материалов, например, алюминия и меди. Это происходит, благодаря преобразованию сухого трения, которое является основной причиной образования наростов, в эквивалентное вязкое при действии высокочастотной вибрации [2].

4. Обрабатываемые поверхности. Совершенно естественно, что изменение характера резания при наложении ультразвуковых колебаний приводит к изменению качества обрабатываемой поверхности, что видно на рис. 4.

На рис. 4, а, б приведены фотографии поверхностей детали из закаленной стали, обработанной традиционным (левые фрагменты) и ультразвуковым точением (правые фрагменты) при скоростях резания порядка 10 м/мин (а), 60 м/мин (б) и подаче 0,05 мм/об. Видно радикальное различие качества поверхностей. Поверхность, полученная ультразвуковым точением, имеет строго регулярную структуру.

Это подтверждается профилограммой поверхности (рис. 4, в), правая часть которой получена традиционным, а левая – ультразвуковым точением.

Периодические впадины с шагом подачи 0,05 мм, которые прослеживаются на обеих частях профилограммы - это след вершины резца.

На рис. 4, б на участке ультразвукового точения отчетливо видны периодические отпечатки, вследствие периодических с частотой 20 кГц соударений резца с обрабатываемым изделием. Подобные отпечатки при большем увеличении наблюдаются и на поверхности рис. 4, а, но здесь они не просматриваются, так как их шаг значительно меньше из-за малой скорости резания.

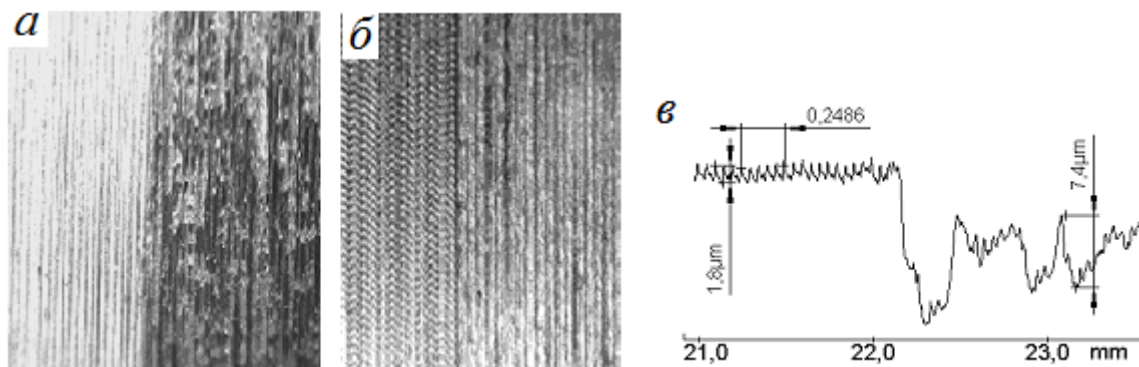


Рис. 4

Таким образом, высокая стабильность режимов авторезонансной ультразвуковой обработки открывает возможность получения поверхностей с заданными геометрическими характеристиками. Такие поверхности могут обладать улучшенными трибологическими свойствами. Подбирая форму режущих кромок резцов, можно получать поверхности с чистой, приближающейся к полученной шлифованием.

Причина такого различия результатов резания заключается в изменениях режима резания. При традиционном резании при непрерывном взаимодействии резца и детали зона пластической деформации, расположенная в окрестности режущих кромок, распространяется со скоростью резания. Эта зона насыщена микротрещинами, распределенными случайным образом. Рост той или иной микротрещины так же происходит случайным образом. Поэтому получаемая в результате резания поверхность имеет не регулярное распределение микронеровностей. Ультразвуковое резание происходит в результате периодических микроударов, следующих с высокой частотой. При этом каждый цикл нагружения начинается при одних и тех же начальных условиях. Вследствие высокой частоты следования и кратковременности импульсов зона пластической деформации сосредоточена в малой окрестности вершины резца и не насыщается микротрещинами, которые не успевают расти за столь короткий промежуток времени. Поэтому при ультразвуковом резании со стабильным режимом колебаний, который обеспечивается авторезонансной системой возбуждения, след резца на поверхности детали - это фактически отпечаток его формы, что видно на рис. 4.

Большую роль в формировании структуры материала в поверхностных слоях играют тепловые процессы в зоне резания. При одной и той же скорости резания за одинаковый достаточно продолжительный промежуток времени в процессе традиционного и ультразвукового резания затрачивается одинаковая энергия на пластическую деформацию и трение и, следовательно, производится одинаковое количество теплоты. Разница состоит в том, что в первом случае теплота выделяется непрерывно и температура в рабочей зоне устанавливается при балансе скоростей поступления и отвода тепла в любой момент времени, причем отвод тепла происходит непрерывно и равномерно в обрабатываемую деталь, в резец и в окружающую среду.

В случае ультразвукового резания выделение теплоты происходит импульсами во время действия импульсов сил резания. При этом происходит импульсное повышение температур обрабатываемого материала в зоне резания и материала резца в окрестности режущих кромок. В каждый момент времени температура изделия и резца определяется двумя процессами: нагревом, определяемым удельной теплоемкостью материалов, и охлаждением, определяемым коэффициентами их теплопроводности и градиентом температур. В промежутках между импульсами происходит процесс охлаждения нагретых зон детали и резца. В результате средняя температура в зоне резания при ультразвуковой обработке оказывается значительно ниже, чем при традиционной. Иначе протекают процессы фазовых

переходов и изменения структуры поверхностного слоя. Это подтверждают проведенные эксперименты и результаты конечноэлементного моделирования процессов резания [16].

5. Наноструктуры. Появление наноструктур отмечено при ультразвуковой обработке практически всех обработанных металлов. Проблема получения наноматериалов, предназначенных для различных областей техники, давно является предметом обсуждений [17].

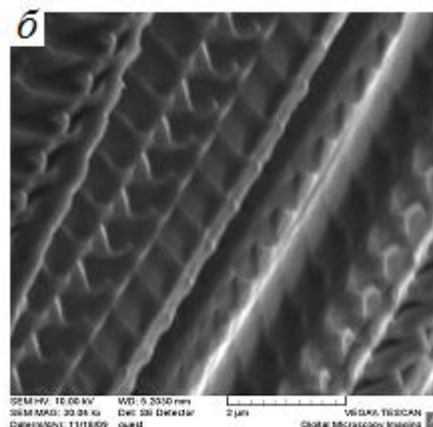
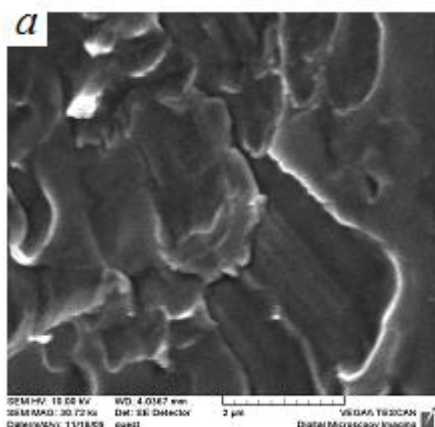
Было показано, что наноструктурирование поверхностного слоя металлических материалов может обеспечить повышение прочностных характеристик при одновременном увеличении их пластичности. Достижение подобного эффекта помимо формирования наноразмерных структур в поверхностном слое обеспечивается за счет создания так называемого барьерного подслоя, который представляет собой материал с полосовой дислокационной субструктурой, препятствующей проникновению дефектов с поверхности в объем нагружаемого материала [3].

Одним из методов создания наноструктурного состояния в поверхностном слое и обеспечения градиентного изменения характеристик прочности по глубине обработанного материала как раз и является ультразвуковая обработка поверхности. Например, было показано [4], что характерной особенностью структуры поверхностного слоя холоднокатаного титана, подвергнутого ультразвуковой обработке, является наличие полосовой дислокационной субструктуры в виде параллельных дислокационных субграниц.

В работе [5] использовали ультразвуковую финишную обработку (УФО) для повышения эффективности ионного азотирования стали 40X13, что связывали с повышением интенсивности протекания диффузионных процессов при увеличении степени дефектности металлических сплавов. При этом были выявлены температурные режимы, обеспечивающие максимальное увеличение микротвердости в упрочненном поверхностном слое, а также показано, что предварительное безабразивное ультразвуковое выглаживание поверхности при последующем ионном азотировании оказывает влияние на увеличение толщины модифицированного слоя на глубину до 25-30 мкм. Также, как правило, ультразвуковая (финишная) обработка сталей, сопровождается увеличением износостойкости обработанных поверхностей.

За счет высочайшей эффективности авторезонансных способов организации обработки, именно использование технологий АРУЗО оказывается одним из самых перспективных способов проведения УФО [6 – 8, 16]. Появление структур и регулярность поверхностного воздействия при авторезонансном резании металлов хорошо видны на рисунках 5, 6, 7.

На рис 5, а показан результат обработки меди М2р без ультразвуковых колебаний резца. Четкое структурирование материала показано на рис. 5, б, где была использована АРУЗО. Наиболее четко видны упрочняющие наноструктуры после проведения травления образцов.



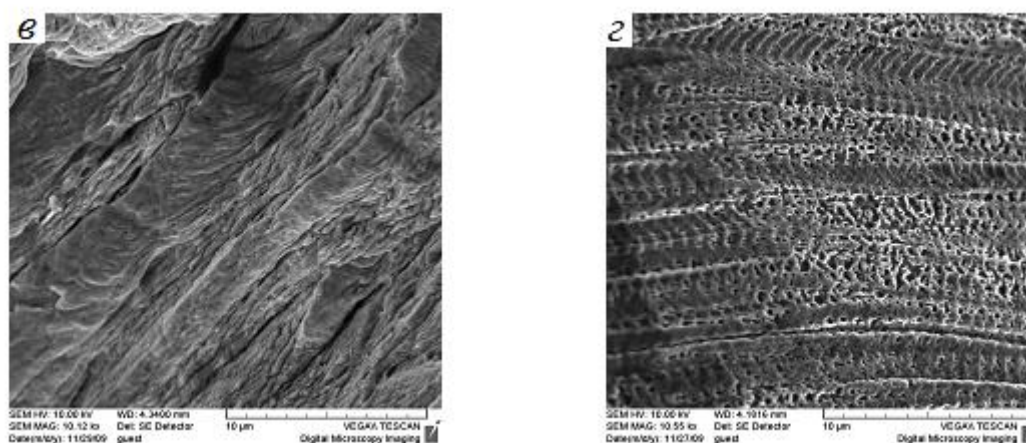


Рис.5

На рис. 5, в показан результат обработки без применения ультразвука (время травления – 10 мин.); протравленный слой при использовании ультразвукового резания (время травления – то же) дан на рис. 5, г. Хорошо видны получившиеся в результате упрочняющие поверхность наноструктуры.

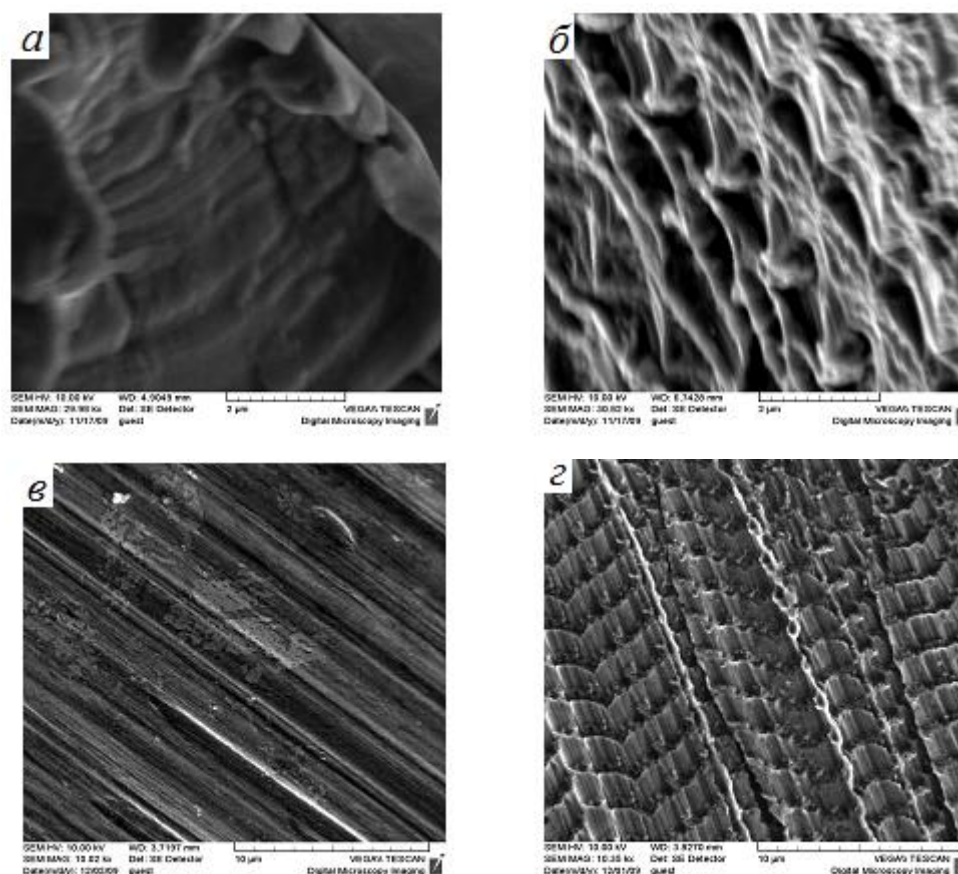


Рис.6.

На рис. 6 показаны аналогичные результаты, полученные при изучении латунной стружки ЛС59-1: (а) - резание без ультразвука, (б)- режим АРУЗО; (в), (г) – аналогичные результаты с травлением (продолжительность 10 мин.).

Схожие результаты были получены и для других металлов. Например, на рис. 7 показано: (а) - результат стандартной токарной обработки, подкаленной стали Ст45, (б) – токарная обработка в присутствии ультразвука, на рис. (в) – дана картина упрочняющих наноструктур структур, возникающих после АРУЗО.

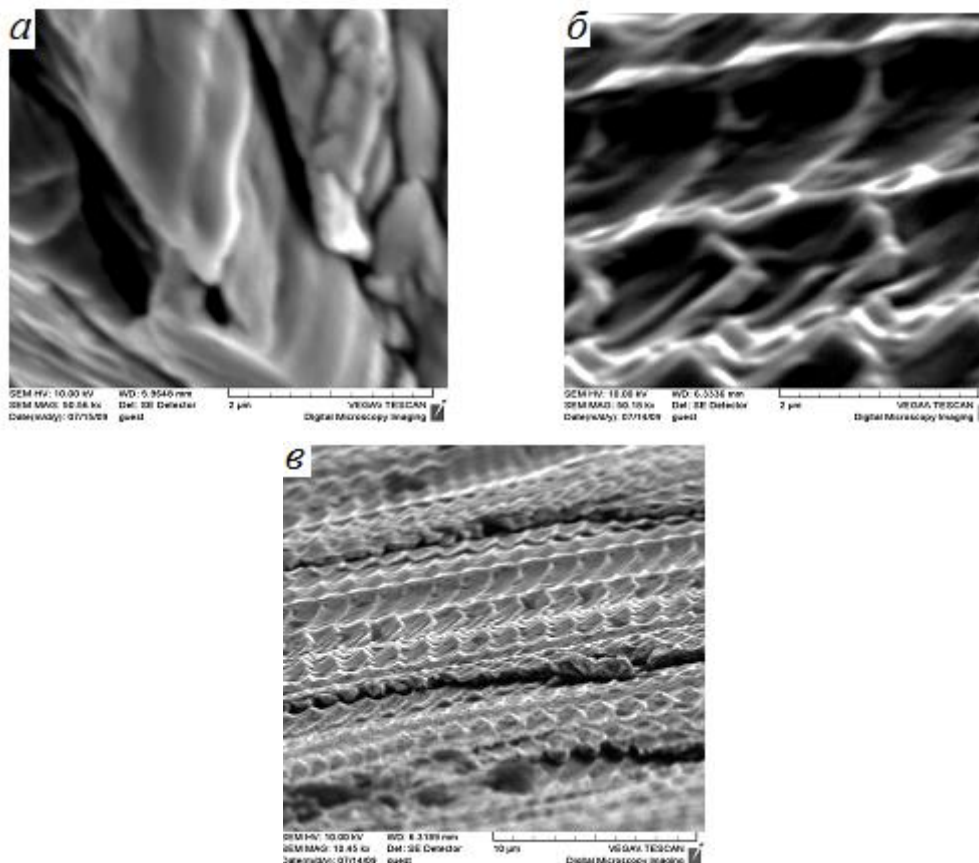


Рис. 7

6. Исследования структурирования. Для получения информации по структурированию и состоянию поверхности после авторезонансной ультразвуковой токарной обработки были изготовлены шлифы и сделаны их оптические (Neofot-32) и электронномикроскопические (РЭМ Tescan) фотографии. С помощью растрового электронного РЭМ Tescan были проведены фрактографические исследования. (Фрактография – это методы исследования изломов или, если говорить совсем обще – «наука об изломах».)

На рентгеновском дифрактометре Дрон-3М были измерены размеры областей когерентного рассеяния.

На снимках видны растравленные (и потому тупые) трещины, скачки деформации, «вторая» фаза. Однако зёрненная структура при травлении не проявилась. Возможно это вызвано тем, что при образовании стружки в кристаллической решётке зёрен возникло столько дефектов, что их суммарная упругая энергия оказалась сравнима с энергией границ. В результате и зёрна и границы травятся с одинаковыми скоростями.

Фрактограммы стружки после УЗ воздействия свидетельствуют об увеличении вязкости материала (площадь, которую можно характеризовать как ямочное разрушении значительно возросла), а также об уменьшении количества трещин.

Измерение размеров областей когерентного рассеяния показало, что их размер колеблется от 50 нм до 0,3 мкм и более. Разброс размеров на порядок обусловлен следующим обстоятельством: вблизи свободных поверхностей, образованных движением трещин, упругие

поля напряжений от мезодефектов, ответственных за протекание деформационного измельчения структуры, отрелаксировали, в результате чего в этих областях, по-видимому, сохранилась зёрнистая структура исходного материала с размером зёрен порядка 1 мкм. В других же областях, где деформация протекала с сохранением сплошности, зёрнистая структура дополнительно измельчилась вплоть до нанокристаллической.

Измерение и расчет микротвердости образцов, после авторезонансного резания приведены в таблице 1. Видно, что все образцы, подвергнутые АРУЗО имеют прирост микротвердости от 10 до 80%.

Таблица 1

	Ребро после АРУЗО		Середина боковой плоскости	
	Микротвёрдость H□,МПа.	абсол. ошибка □H□,МПа	Микротвёрдость H□,МПа.	абсол. ошибка □H□,МПа
Лат. 13	3245	218	2826	122
Лат. 14	3013	124	2480	161
Нерж. 31	6140	318	3733	285
Нерж. 33	6140	209	3924	94
Сталь 41	6094	584	4791	351
Сталь 44	4847	94	4015	201

Испытание микротвердости методом вдавливания производилось на приборе ПМТ-3 и стандартизовано (ГОСТ 9450-60). В качестве индентора при измерении микротвердости использовалась правильная четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136° . Эта пирамида плавно вдавливается в образец при нагрузке от 2 до 200 г. Число микротвердости H определяется по формуле:

$$H = 1854 \cdot \frac{P}{d^2} \left[\frac{H}{M^2} \right],$$

где P – нагрузка, в H ; d – диагональ отпечатка, в m ;

Метод используется для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка. Главное его назначение – оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разницы в твердости разных участков этих составляющих.

Микротвердость измеряют на металлографических шлифах, приготовленных специальным образом. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости $d/7$ – составляет несколько микрон и соизмерима с глубиной получаемого в результате механической шлифовки и полировки наклепанного поверхностного слоя. Поэтому очень важно правильно подготовить поверхностный слой образца. Все поверхностные дефекты (окалина, выбоины, вмятины, грубые ризки) должны быть удалены. При измерении микротвердости расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее двух длин диагонали большого отпечатка. Таким же должно быть расстояние от центра отпечатка до края образца. Длина диагонали отпечатка должна быть не более полуторной толщины образца.

Способ ультразвукового выглаживания и резания используемый для того, чтобы добиваться снижения шероховатости, повышения микротвердости и формирования сжимающих остаточных напряжений известен и обсуждается специалистами несколько десятилетий.

Однако эффективных теоретических моделей упрочнения материалов при авторезонансном резании, опирающихся на современное состояние исследований в этой области создано, по-видимому, не было.

Среди механических свойств нанокластеров и наноструктур необходимо отметить высокую твердость и высокую пластичность. Прежде всего, твердость наноструктуры должна возрастать с уменьшением размера кластера.

С другой стороны, при нанометровом размере большое значение имеет диффузионное скольжение нанокристаллитов, и скорость деформации значительно возрастает. Таким образом, прочностные свойства наноматериала определяются соотношением между пределом текучести (прочностью) и скоростью деформации. Еще одним фактором увеличения скорости деформации следует считать возрастание коэффициента диффузии при уменьшении размера кластера.

Классические технологии ультразвуковой обработки материалов позволяют получать поверхностные и приповерхностные наноструктуры, но только авторезонансные технологии могут обеспечить стабильность структурированности и заданные свойства поверхности после обработки, получение нанокристаллических структур с определенными параметрами.

Получение при авторезонансном ультразвуковом резании стали, меди или латуни специфических высокоэффективных, с точки зрения физико-механических свойств нанокристаллических структур указывает на важность изучения и развития метода ультразвукового резания и выглаживания материалов.

7. Неметаллические материалы. Технологии АРУЗО, естественно, позволяют обрабатывать не только металлы, но и другие трудно обрабатываемые материалы, такие, например, как стекло. На рис. 8 показан фрагмент цилиндрической поверхности стеклянного изделия, обработанного резцом при помощи технологии АРУЗО (слева) и той же поверхности после выключения ультразвука (справа). Разница очевидна.

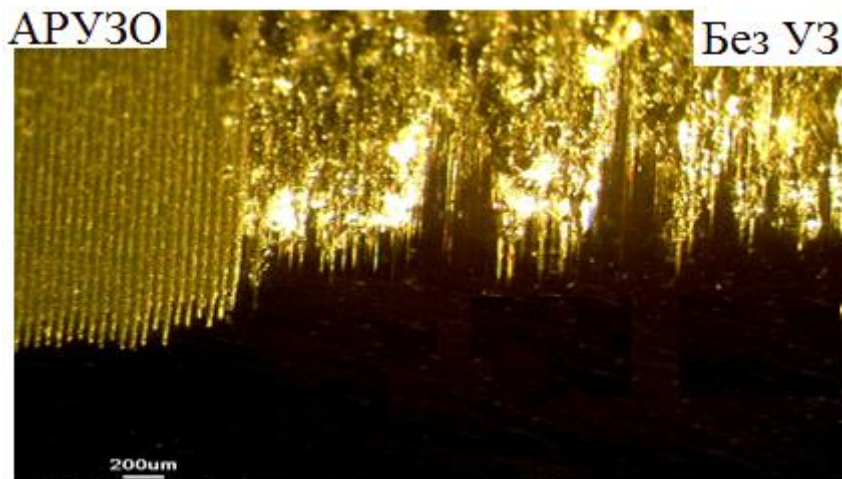


Рис. 8

На рис. 9 показан результат обработки специального (ниобиевого) стекла, характеризующего повышенной твердостью.

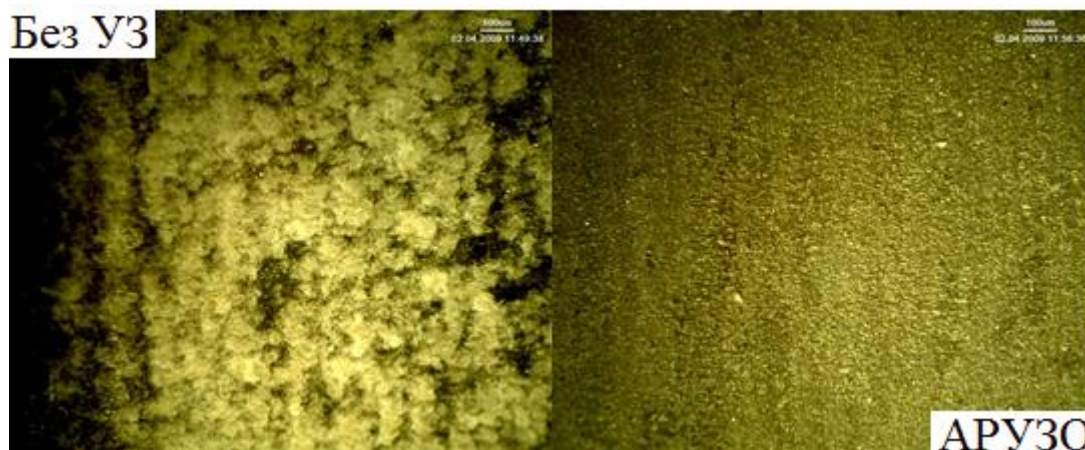


Рис. 9

Здесь также различие представляется очевидным.

Как указывалось, вопрос о построении теоретических моделей рассмотренных здесь явлений, вообще говоря, представляет собой совершенно самостоятельную проблему [13].

8. Заключение. Сказанное выше можно резюмировать следующим образом. Разработанные устройства для токарной обработки позволяют:

1. Существенно снизить силы резания;
2. Обрабатывать технологически нежесткие изделия без поддерживающих люнетов;
3. Создать упрочнённые приповерхностные слои материала;
4. Проводить точение сверхтвердых и хрупких материалов;
5. Повысить точность обработки изделий;
6. Увеличить стойкость инструмента;
7. Улучшить чистоту и качество поверхности деталей;
8. Устранить возможность возникновения автоколебаний при резании.

Необходимо отметить, что разработан ряд других промышленных авторезонансных ультразвуковых устройств:

Специализированное устройство для **поверхностного упрочнения** деталей предназначено для повышения чистоты поверхностей и упрочнения поверхностного слоя деталей.

Устройство для **волочения проволоки** предназначено для изготовления проволоки, например, тонких нитей из драгоценных металлов.

Ультразвуковое устройство, для **размерной обработки отверстий и полостей** произвольной формы в хрупких материалах.

Наряду с промышленными предложены и **бытовые авторезонансные ультразвуковые устройства.**

Шпатель. Предназначен для шпаклевки поверхностей. Исключает прилипание шпаклевки к инструменту. Позволяет получать тонкие слои шпаклевки. Обеспечивает ее лучшую адгезию с обрабатываемой поверхностью. Аналогичное устройство можно использовать для нанесения кремов в косметических и лечебных целях.

Нож. Предназначен для нарезания продуктов склонных к смятию и прилипанию (свежий хлеб, сыр, торты и пр.).

Стамеска. Предназначена для вырезания по дереву и изготовления пазов в деревянных изделиях, например, гнезд для врезных замков.

Крейцмейсель. Предназначен для вырезания по металлу, например, для нанесения рисунка на металлических поверхностях или изготовления форм для ювелирных изделий из драгоценных металлов.

Устройство для заточки лезвий ножей и скальпелей. Производит заточку с одновременным упрочнением лезвий путем пластического деформирования (отбивания) лезвия. Может применяться для отбивания лезвия косы.

Этот список может быть существенно расширен. Прежде всего, за счет разнообразных вибрационных технологических машин, работающих в доультразвуковых диапазонах частот [19].

Авторы благодарны Л.В. Колику и В.Н. Перевезенцеву за участие в работе.

Список литературы

1. *Асташев В.К.* О влиянии ультразвука на процессы пластичного деформирования // *Машиностроение.* 1983. № 2. С. 3-12.
2. *Асташев В.К.* Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 1992. № 3. С. 81—89.
3. *Панин В.Е., Панин Л.Е.* Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // *Физическая мезомеханика.* 2004. Т. 7. № 4. С. 5-23.
4. *Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И. и др.* Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // *Физическая мезомеханика.* 2002. Т. 5. № 4. С. 73-84.
5. *Клименов В.А., Ковалевска Ж.Г., Уваркин П.В. и др.* Ультразвуковое модифицирование поверхности и его влияние на свойства покрытий // *Физическая мезомеханика.* 2004. Т. 7. Специальный выпуск. Ч. 2. С. 157—160.
6. *Astashev V.K., Babitsky V.I.* Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process // *Ultrasonics.* 1998. № 6. P. 89-96.
7. *Astashev V.K., Babitsky V.I.* Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. Springer. 2007. 330 p.
8. *Асташев В.К., Крупенин В.Л.* Нелинейная динамика ультразвуковых технологических процессов. М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2016. – 372 с.
9. *Асташев В.К., Андрианов Н.А., Крупенин В.Л.* Устройство для возбуждения и автоматической стабилизации резонансных колебаний ультразвуковых систем // **Патент RU 2350405 С2. Бюлл. изобретений. 2009. № 9.**
10. *Асташев В.К., Крупенин В.Л.* Инновационные авторезонансные вибротехнологии // *Современные наукоемкие технологии.* 2008. № 7. С. 84—85.
11. *Крупенин В.Л., Колик Л.В.* Об авторезонансных нанотехнологиях // *Современные наукоемкие технологии.* 2009. № 4. С. 63—64.
12. *Асташев В.К., Крупенин В.Л.* Инновационные авторезонансные вибротехнологии // *Современные наукоемкие технологии.* 2008. № 7. С. 84-85.
13. *В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, В.Н. Перевезенцев, Л.В. Колик, Н.А. Андрианов* К изучению свойств наноструктурированных материалов, полученных в результате авторезонансной ультразвуковой обработки // интернет-журнал. *Вестник научно-технического развития.* № 11 (39). 2010. С. 3-12.
14. *Асташев В.К., Андрианов Н.А., Козочкин М.П., Колик Л.В., Крупенин В.Л., Солис-Пинарготе Н.В.* К реализации авторезонансных ультразвуковых технологий // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* №6. 2009. С. 52-58.
15. *Асташев В.К., Андрианов Н.А., Крупенин В.Л., Перевезенцев В.Н., Колик Л.В.,* Свойства поверхностных слоев, наноструктурированных в результате авторезонансного ультразвукового точения // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2011. № 5. С. 68-72.

16. *Асташев В.К., Разинкин А.В.* Моделирование термомеханических процессов при ультразвуковом резании методом конечных элементов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 68-74.
17. *Гусев А.И., Ремпель А.А.* Нанокристаллические материалы. М., Физматлит, 2000. 223 с.
18. *В.К. Асташев, Н.А. Андрианов, Л.В. Колик, В.Л. Крупенин.* Авторезонансная ультразвуковая технология резания // Интернет – журнал. Вестник научно-технического развития. № 1 (29). 2010 г. С.3 – 10.
19. *Крупенин В.Л.* Машины ударного действия. М: Знание. 1987,-62 с.

Дата поступления статьи: 16 января 2017 года.