

*ШИЛЯЕВ А. С.,
кандидат физико-математических наук*

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ И ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛА

Применение в машиностроении сталей и сплавов, обладающих большой вязкостью при малой теплопроводности и высокой прочности, что обуславливает весьма низкую обрабатываемость их резанием, требует изыскания новых средств, изменяющих характер взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали, от которого в основном зависит износ режущего инструмента.

За последние годы все большее внимание исследователей, занимающихся вопросами механической обработки, привлекают последние достижения физической науки, к числу которых относятся ультразвука.

В 1954—1965 гг. в Советском Союзе Е. Г. Коноваловым были проведены опыты по изучению вибрационного резания. Было установлено, что высокочастотные колебания (частотой 6,9 кгц) позволяют улучшить чистоту поверхности на один класс и на 20% снизить силу резания в тангенциальном направлении.

В последние годы проведен ряд экспериментальных и теоретических работ в этом направлении [1-5], которые еще не вышли из стадии экспериментирования. Полученные же результаты дают основание полагать, что применение ультразвуковых колебаний при резании на ряде операций облегчит процесс пластической деформации в зоне резания. Это должно привести к улучшению качества обрабатываемой поверхности и увеличению стойкости инструмента. Однако, несмотря на сказанное, вибрационное резание с ультразвуковой частотой до сих пор изучено еще недостаточно.

Целью настоящей работы было выяснение некоторых физических закономерностей влияния ультразвука на процесс резания и обрабатываемый материал. Экспериментальная часть работы была пачата в 1960 г. в лаборатории ультразвука Научно-исследовательского технологического института под руководством автора при участии сотрудников лаборатории: Плеханова О. А., Курса В. В., Верзакова Ю. Н., Ярославцева И. М., Солодянкина Г. А., Бочкарева Р. И.

Изучение резания при наложении на резец ультразвуковых колебаний проводилось при наружном точении стали ЭИ654 в

состоянии поставки $\sigma_B = 70 \text{ кг/мм}^2$ на станке ИИ61 с высотой центров 175 мм, имеющем диапазон продольных подач от 0,1 до 4 мм/об и ступенчатое изменение чисел оборотов шпинделя от 12,5 до 2500 об/мин. Мощность электродвигателя главного движения станка 7 квт.

Для проведения экспериментальной работы был изготовлен опытный инструмент из стали Р18, термически обработанной на твердость HRC 62—65. Использовались также резцы с пластинами твердого сплава ВК8 и ВК6М, которые припаивались к державке из стали 45 с твердостью HRC 30—40.

Для наложения ультразвуковых колебаний на резец был использован магнитострикционный вибратор. Все эксперименты проводились на частоте 20 кГц с использованием генератора типа УЗ1-10М.

Измерение величины амплитуды производилось микроскопом МБУ-4 с объективом 20×0,40 и микрометром окулярным, винтовым МОВ-1-15Х, закрепленным на резцедержателе. Для контроля за изменением величины амплитуды в процессе резания была приспособлена электромагнитная головка.

В якорь головки закреплялась игла, которая устанавливалась в углубление резца. Колебания инструмента подавались через иглу якорю. Так как частота колебаний в процессе опыта оставалась практически постоянной, то изменение ЭДС электромагнитной головки зависело только от изменения величины амплитуды. Изменение ЭДС электромагнитной головки регистрировалось ламповым вольтметром МВО-2М, по показанию которого можно было судить об изменении величины амплитуды и в случае необходимости восстанавливать ее под настройкой генератора.

Измерение частоты ультразвуковых колебаний велось прибором ИЧ-7, подсоединенным через делитель напряжения параллельно питанию магнитостриктора.

Измерение температуры, возникающей в зоне резания, произ-

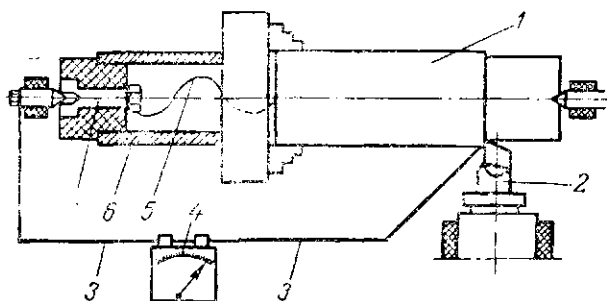


Рис. 1. Схема измерения температуры:

1 — обрабатываемый образец; 2 — резец; 3 — соединительные провода; 4 — гальванометр; 5 — провод, соединяющий образец с токосъемником; 6 — гильза; 7 — токосъемник.

водилось методом естественной терморпары (рис. 1). Обрабатываемый образец 1 защищался от токов рассеивания изоляционным кольцом в трехкулачковом патроне и гильзой 7 в задней бабке. А с токосъемником 6 он через полый шпindelь станка соединялся проводом 5, один конец которого был припаян к образцу, другой прижимался гайкой к токосъемнику. Гальванометр 4 с токосъемником и резцом 2 соединялся проводами 3.

Методика исследований содержит в себе два этапа: предварительные и основные испытания.

Первый этап исследований процесса резания при наложении на резец ультразвуковых колебаний проводился с целью выявления наиболее эффективного направления колебаний, величины амплитуды, а также материала режущей части инструмента. Эти данные использовались во всех последующих (основных) исследованиях. Колебания создавались в наиболее выгодном направлении и амплитуде, при наиболее стойкой режущей части инструмента. Исследования проводились при наружном точении стали ЭИ654.

Второй этап исследований включал в себя выявление характера износа инструмента с наложением ультразвуковых колебаний. Определялась чистота обработки, стойкостные и силовые функциональные зависимости от скорости подачи и глубины резания.

Все функциональные зависимости проводились с вибрациями и без вибраций при одних и тех же условиях.

Опыты по выявлению наиболее эффективного направления приложения колебаний проводились в трех направлениях: в радиальном вдоль режущей кромки, по продольной подаче перпендикулярно режущей кромке и в тангенциальном направлении.

Схема ввода колебаний представлена на рис. 2.

Для проведения исследований были созданы для каждого

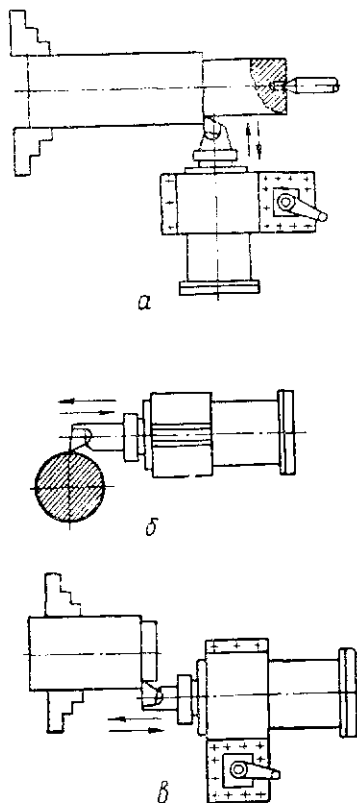


Рис. 2. Схема ввода колебаний: а — в радиальном, б — в тангенциальном, в — в направлении подачи.

направления колебаний резцы с одной и той же геометрией режущей части. Это позволило избежать дополнительного конструкторского решения применительно к ультразвуковой установке или оборудованию.

В каждом выбранном направлении колебаний проводилось определение стойкости от величины амплитуды. Для оценки эффективности применения ультразвуковых колебаний были проведены опыты, колебания в которых отсутствовали.

Во всех графиках кривая 1 обозначает точение с наложением на резец ультразвуковых колебаний, а кривая 2 — обычное точение.

В проведенных опытах за критерий затупления принимался износ по заданной поверхности, равный 1 мм. Величина износа измерялась лупой Бриннеля с ценой деления 0,05 мм. Условия проведения опытов и результаты стойкостных зависимостей при нагруженном точении резцами из стали Р18 приведены на рис. 3, из которого видно, что ультразвуковые колебания в каждом направлении с изменением амплитуды оказывают характерное влияние на стойкость инструмента.

Введение в зону резания колебаний в радиальном направлении вдоль режущей кромки оказало отрицательное воздействие на стойкость резцов, которая уменьшилась с увеличением амплитуды. При направлении колебаний по подаче перпендикулярно режущей кромке наблюдалось резкое снижение стойкости в режиме малых амплитуд (4 мк). С увеличением колебаний стойкость резцов повышалась, но оставалась на заданных амплитудах ниже стойкости в опытах, проведенных без колебаний.

Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний возможно еще более повысит стойкость резцов, но опытная ультразвуковая установка ограничивает проводимые исследования в данном направлении. Колебания в тангенциальном направлении в режиме малых амплитуд дали увеличение стойкости инструмента в

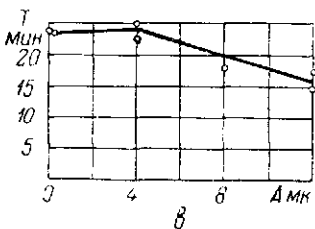
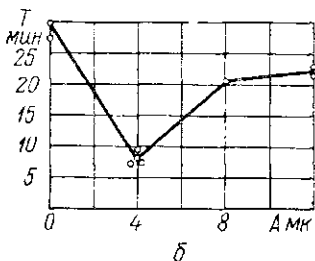
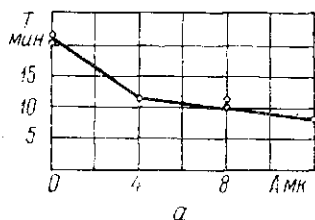


Рис. 3. Влияние направления и амплитуды A ультразвуковых колебаний на стойкость T резца. Колебания: a — в радиальном направлении вдоль режущей кромки; b — в направлении подачи перпендикулярно режущей кромке; $в$ — в тангенциальном направлении. $v = 8$ м/мин; $t = 1$ мм; $S = 0,2$ мм/об.

сравнении с опытами, проводимыми без колебаний, но с увеличением амплитуды происходило снижение стойкости. Точение резцами из сплава ВК8 и ВК8М с наложением ультразвуковых колебаний приводило к выкрашиванию режущих кромок твердосплавных пластинок. Нам не удалось найти характеристики ультразвуковых колебаний, которые позволили бы избавиться от выкрашивания твердосплавных резцов и увеличить стойкость их при резании жаропрочных сталей и сплавов.

Дальнейшие исследования проводились на наиболее эффективных ультразвуковых параметрах: при сообщении ультразвуковых колебаний инструменту в тангенциальном направлении в режиме малых амплитуд.

Исследования обрабатываемости стали ЭИ654 при точении с наложением на резец ультразвуковых колебаний с частотой 20 кГц, которые задавались в тангенциальном направлении (вдоль вектора скорости), проводились с величиной амплитуды 4 мк резцами из Р18.

Резцы в процессе обработки охлаждались пятипроцентной эмульсией. Для оценки эффективности введения в зону резания ультразвуковых колебаний каждый эксперимент проводился дважды: с колебаниями и без колебаний.

На рис. 4 приведена зависимость износа резца от времени работы.

Износ резца с наложением на него ультразвуковых колебаний менее интенсивен, чем без колебаний. Существенные изменения условий взаимодействия передней и задней поверхностей контакта режущей части инструмента и обрабатываемого материала при наложении на резец

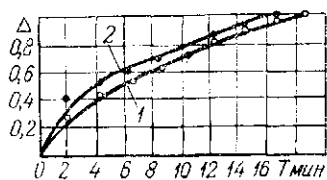


Рис. 4. Зависимость износа резца от времени работы.

ультраульковых колебаний приводят к периодическому повороту векторов сил трения, улучшению условий доступа смазочно-охлаждающей жидкости в рабочую зону, а следовательно, к облегчению процесса стружкообразования.

С другой стороны, отсутствие нароста, который наблюдается при обычном резании, не способствует защите режущей кромки от истирающего действия со стороны стружки и обработанной поверхности. Этим, по-видимому, можно объяснить, что при значительном облегчении процесса стружкообразования разница в износе резца от времени работы незначительна.

Данное предположение, возможно, следует распространить и на стойкостные зависимости резца от скорости, подачи и глубины резания (рис. 5).

Результаты исследований дают возможность считать, что увеличение сечения стружки приводит к ослаблению влияния ультразвуковых колебаний на процесс резания (рис. 5, б, в).

Зависимость стойкости резца от скорости резания имеет одинаковый характер как при точении с наложением колебаний, так и при обычном точении (рис. 5, а).

Характер влияния ультразвуковых колебаний на температуру резания от скорости, подачи и глубины резания такой же, что и у стойкостной зависимости (рис. 6). Снижение температуры резания при наложении на резец ультразвуковых колебаний сле-

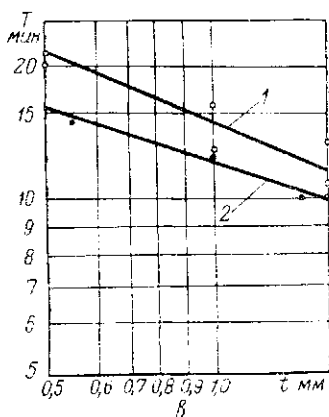
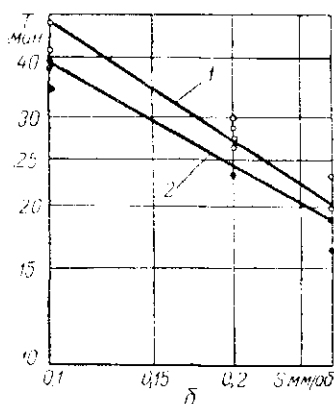
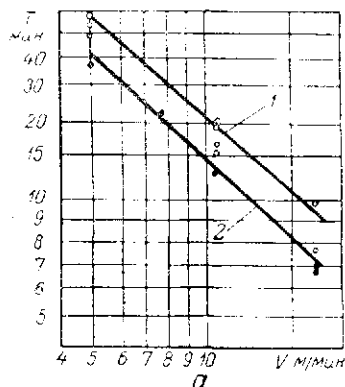


Рис. 5. Зависимость стойкости резца от: а — скорости, б — подачи и в — глубины резания.

дует искать, по-видимому, в уменьшении пластических деформаций срезаемого слоя, на которые, на наш взгляд, большое значение оказывает смазочно-охлаждающая среда. Проникновение смазочно-охлаждающей среды на трущиеся поверхности при обычном резании происходит от колебаний режущего инструмента и обрабатываемой детали [6].

При вынужденных высокочастотных колебаниях создаются благоприятные условия для проникновения смазочно-охлаждающей среды на контактные поверхности. Кроме того, проникновение смазочно-охлаждающей жидкости происходит в распылен-

ном состоянии, что увеличивает ее охлаждающую способность.

Данные измерений величины $H_{ск}$ и $H_{ср}$ показали, что применение ультразвуковых колебаний малой амплитуды незначительно влияет на чистоту обработки. Так, при скорости резания 15 м/мин и при подаче 0,3 мм/об положительное влияние ультразвука на чистоту обработки поверхности прекращается (рис. 7).

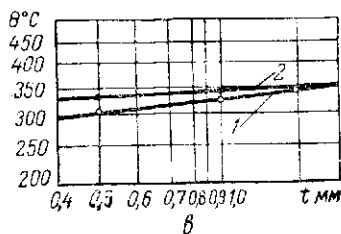
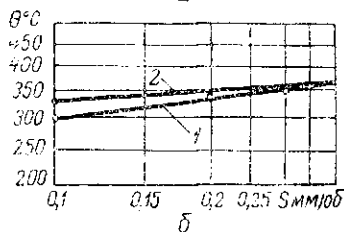
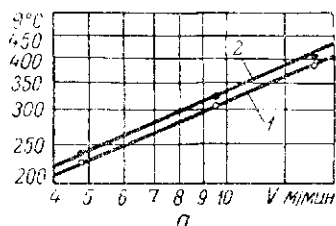


Рис. 6. Зависимость температуры резания при точении стали от: а — скорости, б — подачи, в — глубины резания; $v = 8,5$ (б) и 9 (в) м/мин; $t = 0,5$ (а) и $0,7$ (б) мм.

По-видимому, при точении с наложением ультразвуковых колебаний увеличение резания свыше 15 м/мин приводит к разрушению нароста. Этим самым резцы при образовании поверхности ставятся примерно в одинаковые условия. С увеличением же подачи интенсивность ультразвуковых колебаний в режиме малых амплитуд недостаточна для полного разрушения нароста, появление которого оказывает отрицательное действие на чистоту обработки.

В процессе проведения опытов было замечено, что при обработке с наложением ультразвуковых колебаний на резец изменяется вид обработанной поверхности, которая из блестящей (при работе ультразвука) становится матовой (при включении колебаний). Это различие заметнее с увеличением амплитуды колебаний.

Часто при работе с ультразвуком большой интенсивности на обработанной поверхности наблюдалось чередование светлых и матовых полос, составляющих с осью детали некоторый угол. Кроме того, в процессе экспериментов было выявлено, что резание с увеличенной амплитудой вызывает в деформируемом слое металла обратимые процессы, которые прекращают свое действие спустя 5—12 мин. после прохода резца.

В результате действия этих процессов твердость обработанной поверхности повышается. По сравнению с твердостью по-

верхности, обработанной при тех же режимах, но без колебаний или с колебаниями малой амплитуды, твердость поверхности, обработанной с амплитудой 12 мк, на 5—8 единиц HRC выше. Замеры по времени показали, что спустя 5—12 мин. после прохождения реза твердость обработанной поверхности становится весьма близкой к твердости поверхности, обработанной без ультразвука. Это явление можно использовать для объяснения

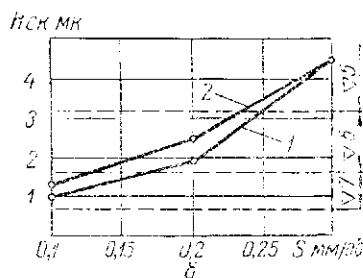
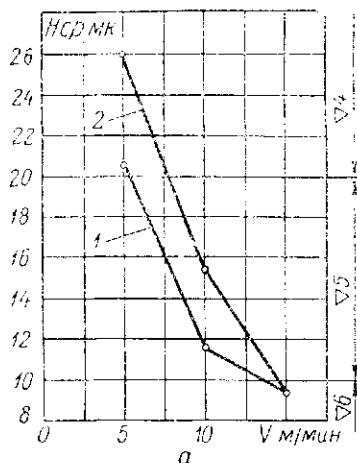


Рис. 7. Зависимость чистоты обработки: а — от скорости резания, б — от глубины.

падения стойкости с увеличением глубины при резании с ультразвуком. Действительно, с увеличением глубины резания увеличивается и площадь инструмента с обрабатываемой поверхностью, которая в этом случае является и площадью акустического контакта. С увеличением площади контакта увеличивается и количество ультразвуковой энергии, проникающей в металл, а следовательно, и объем обратимых микроизменений, вызывающих временное увеличение твердости.

В связи с обнаруженными нами явлениями при ультразвуковом резании металла следует обратить внимание на утверждение, которое содержится в работе Токийского технологического колледжа, что при $v > 2\pi fA$ ультразвуковое резание переходит в обычное и не представляет интереса для исследований. С нашей точки зрения это утверждение не является справедливым, так как не учитывает микроизменений, возникающих в обрабатываемом металле под действием ультразвука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин А. А., Марков А. П. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов. «Станки и инструмент», 1960, № 11.
2. Жустарев Е. Н., Захаров В. И. и др. Обработка металлов

резанием с воздействием ультразвука. Сб. «Применение ультразвука в технологии машиностроения» ЦИИТИ, М., 1960.

3. Исаев А. И., Анохин В. С. Применение ультразвуковых колебаний инструмента при резании металлов. «Вестник машиностроения», 1961, № 5.

4. Марков А. И. О влиянии ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов. Сб. «Промышленное применение ультразвука». Машгиз, 1961.

5. Марков А. И. Воздействие вынужденных ультразвуковых колебаний на процесс резания металлов. Сб. «Применение ультразвука в машиностроении». Изд-во «Наука и техника», Минск, 1964.

6. Гордот М. Б. Влияние смазочно-охлаждающей среды на силы, действующие на рабочие поверхности реза. «Известия высших учебных заведений», «Машиностроение», МВТУ, 1961, № 11.

7. Кикай Гидзюцу (Япония), *Mechanical Engineering*, Vol. 9, № 1, p. 12—18.