УДК 621.9.048.6

НАЛОЖЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

акад., д-р техн. наук, проф. В.В. КЛУБОВИЧ, А.С. ЕРЕМЕЕВ, В.Ф. ЛУЦКО
(Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск)

Рассмотрен процесс обработки изделий сложной геометрической формы бесконечной абразивной лентой с наложением ультразвуковых колебаний. Предложено конструктивное исполнение бесконечной абразивной ленты. Показано, что применение ультразвуковых колебаний при шлифовании и полировании изделий сложной геометрической формы позволяет сократить время обработки и улучшить качество обработки поверхности. Введение ультразвуковых колебаний в рабочую зону снижает силы резания и контактные температуры, интенсифицирует процесс съёма материала изделий, уменьшает величину среднего арифметического отклонения и средний шаг неровностей, обеспечивая высокое качество поверхности.

Введение. Наиболее актуальной задачей машиностроения является повышение качества машин и агрегатов. Основной критерий качества машин и агрегатов – надежность, которая в значительной степени определяется эксплуатационными свойствами комплектующих деталей. В свою очередь эксплуатационные характеристики деталей (усталостная прочность, коррозионная стойкость, антифрикционные свойства и др.) зависят от состояния поверхностного слоя (микротвердости, остаточных напряжений, структуры, шероховатости поверхности), формируемого на финишных стадиях обработки. Среди поверхностей деталей, используемых в машиностроении, следует выделить криволинейные и другие поверхности, имеющие сложную геометрическую форму.

Распространенным методом окончательной обработки изделий сложной геометрической формы из различных материалов является шлифование и полирование бесконечной абразивной лентой. Существуют два типа бесконечных шлифовальных лент: склеенные (шовные) и бесшовные. Склеенные (шовные) ленты изготавливают из шлифовальных шкурок путем разрезания их на полосы необходимой ширины и склеивания предварительно очищенных от абразивного слоя концов заготовок. Основной недостаток этих лент – наличие шва (места склейки), приводящее к преждевременному отказу вследствие разрушения основы. Основой бесшовных лент является рукавная ткань определенного диаметра, которую разрезают на ленты и наносят абразивный слой. Обработка шлифовальной лентой криволинейных поверхностей второго порядка, т.е. поверхностей, имеющих в зависимости от направления движения по ним как положительную (выпуклые), так и отрицательную (вогнутые) кривизну, связана с трудностями в обеспечении плавности всего профиля, размеров, геометрической формы и качества поверхности. Обработка таких поверхностей бесконечными лентами, выпускаемыми промышленностью серийно, приводит к неравномерному съёму материала изделия по ленте, вследствие определенной жесткости ленты в поперечном направлении и несоответствия формы контактирующих поверхностей ленты и изделия, а также при обработке боковых сторон ленты, не имеющих абразивного покрытия, что приводит к интенсивному износу и разрушению лент. Кроме того, шлифование большинства деталей характеризуется высокой теплонапряженностью процесса, большими удельными давлениями в зоне резания и вредными растягивающими напряжениями. Значительные изменения температуры, давления и остаточных напряжений в зоне резания в свою очередь вызывают изменение структуры, фазового состояния и на их основе изменение физико-механических свойств поверхностных слоев металла, что сказывается на эксплуатационных свойствах изделий.

Неравномерный съём материала детали и износ ленты обусловлен неравномерным распределением контактных давлений, которые в свою очередь вызваны определенной жесткостью ленты в поперечном направлении и несоответствием формы контактирующих поверхностей ленты и изделия даже при очень больших усилиях натяжения ленты. Поэтому при обработке выпуклых и вогнутых поверхностей с малыми радиусами кривизны на рабочей поверхности ленты появляются трещины, способствующие интенсивному выпаданию зерен из связки.

Для наиболее высокой приспосабливаемости к обработке криволинейных поверхностей второго порядка в условиях охватывающего контакта изделия необходимы инструменты, обладающие малым модулем упругости, что возможно при нанесении абразива непосредственно на основу ленты, имеющей высокую эластичность в продольном и поперечном направлениях, высокую прочность на разрыв, высокую стойкость и износостойкость и хорошо удерживающей абразив. Необходимо также осуществлять равномерный прижим к обрабатываемой поверхности в направлении поперечного сечения ленты. Для этого требуется иметь инструмент, конструкция и структура которого могла бы при обработке свободной ветвью хорошо приспосабливаться к криволинейной поверхности обрабатываемого изделия и производить при этом равномерный съём материала по направлению поперечного сечения ленты.

Методика и результаты исследований. Для проведения исследований по обработке изделий сложной геометрической формы авторами разработан способ изготовления гибкого абразивного инструмента [1]. В качестве основы берут текстильное полотно, в структуру которого входят термопластичные полимерные нити связи, причем полимерные нити основы имеют бóльшую температуру текучести, чем температура текучести нитей связи. Разность температуры текучести полимерных нитей основы и полимерных нитей связи составляет не менее 20 °С.

Схема изготовления гибкого абразивного инструмента (конструктивное исполнение исходной текстильной ленты, технологическая линия по изготовлению гибкого абразивного инструмента, конструктивное исполнение гибкого инструмента) представлена на рисунке 1.

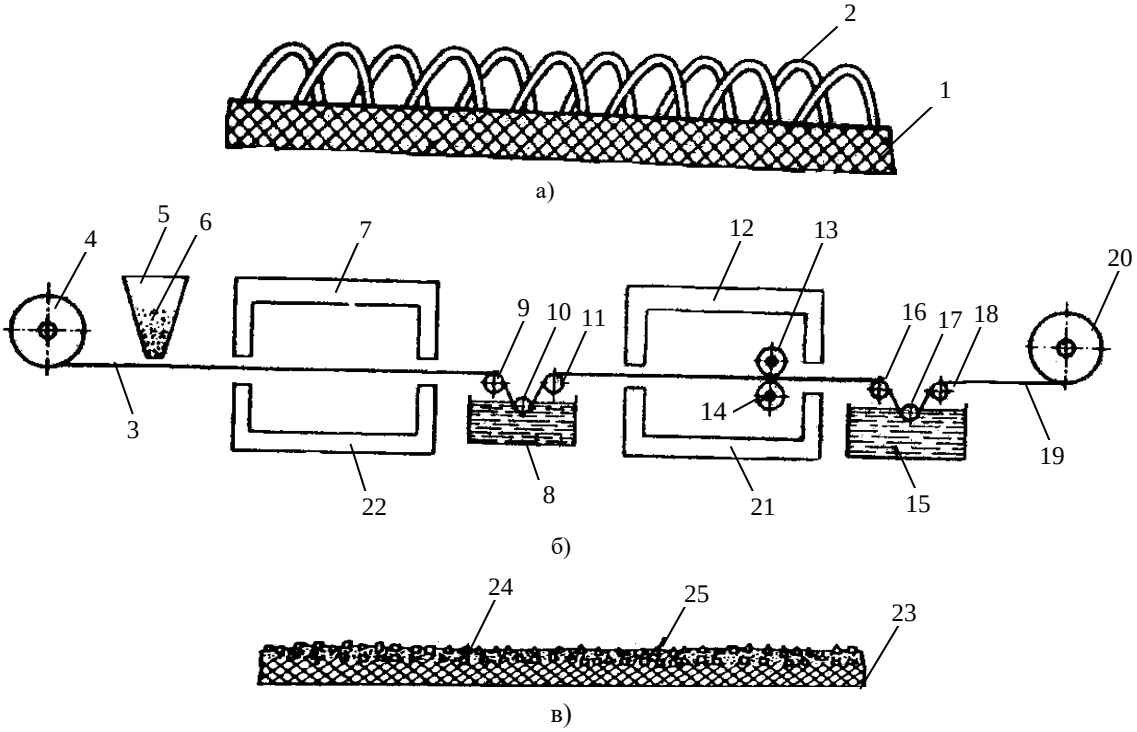

Рис. 1. Схема изготовления гибкого абразивного инструмента:
а – исходная текстильная ленты; б – технологическая линия по производству гибкого инструмента;
в – полученный гибкий элемент

В качестве исходного материала для изготовления гибкого абразивного инструмента брали текстильное полотно (рис. 1), состоящее из грунта *1* и ворса *2*, причем грунт состоял из полиэфирных комплексных нитей «белан», а ворс – из полиамидных нитей.

Способ изготовления гибкого абразивного инструмента состоит в следующем. Полотно *3* (рис. 1, б) сматывают с барабана *4* и на его ворсовую поверхность наносят с помощью устройства *5* абразивные зерна *6* из карбида бора зернистостью 100 мкм. Затем полотно поступает в проходную печь *7*, где оно нагревается до температуры несколько выше температуры текучести для перевода материала нитей, образующих ворс, в вязкотекучее состояние. Температура текучести и размягчения полиамидных нитей составляла 212…219 и 170 °С соответственно, а полиэфирных нитей – соответственно 246…250 и 235 °С. Затем полученный полуфабрикат охлаждали в ванне *8* ниже температуры размягчения связки с использованием роликов *9…11*. В проходной печи *12* производили нагрев полуфабриката до температуры размягчения связки, прокатывали его между валками *13* и *14*. Зазор между валками составлял 1…2 мм. После охлаждения в ванне *15* (с использованием роликов *16…18*) полученный абразивный инструмент *9* с наматывали на приводной барабан *20* с линейной скоростью 0,025 м/с. Для предотвращения термоокислительной деструкции полимера проходные печи *7* и *12* помещали в специальные кожухи *21* и *22* с подачей азота.

Из полученного описанным способом гибкого абразивного инструмента в виде ленты конечной длины изготавливали ленты бесконечной длины (рис. 2), причем края ленты (*1, 2*) были выполнены в виде гиперболических спиралей, что позволяет производить обработку поверхностей или участков изделий, имеющих отрицательную кривизну с большими углами подъёма (малыми радиусами кривизны). В обработке участвует боковая сторона ленты, которая не разрушается. От ширины ленты зависит волнистость обрабатываемой поверхности, величина которой растет при уменьшении ширины ленты. Одна-

ко длина прямолинейного участка ленты (*3*) не должна превышать определённой величины, так как это приводит к возрастанию работы сил трения. Учитывая сказанное, длину прямолинейного участка выбирают в определённом интервале. Анализ литературных данных по ленточному шлифованию, а также опытные наблюдения, позволили установить, что длина прямолинейного участка ленты должна составлять 1,5….2,5 длины ординаты спирали *a*.

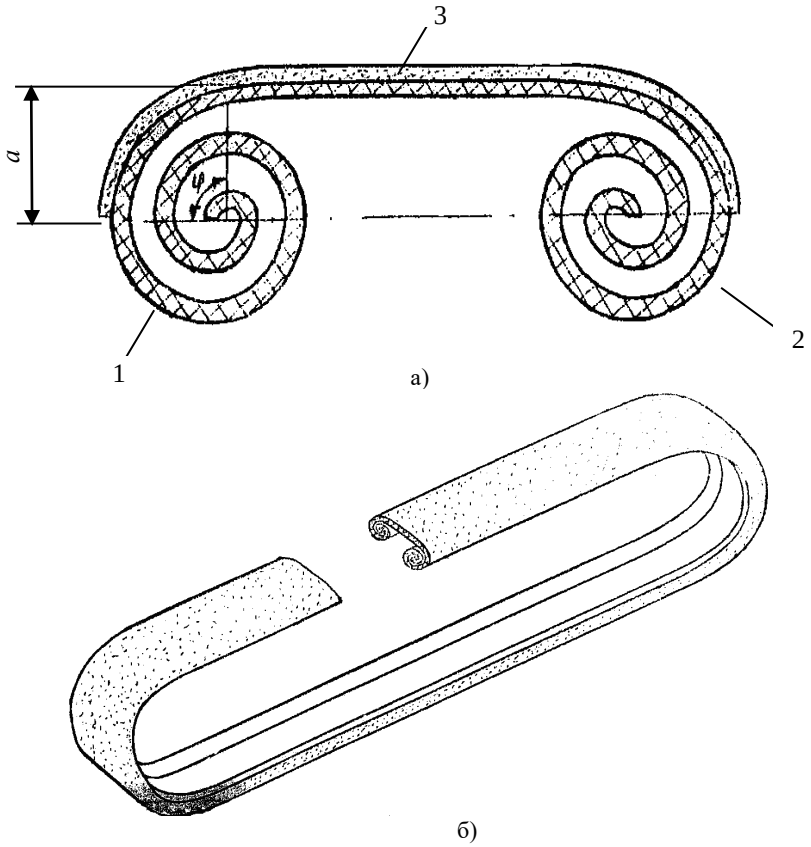

Рис. 2. Гибкий абразивный инструмент:
а – поперечное сечение ленты; б – форма ленты

На ленту, в месте контакта с обрабатываемым изделием сложной геометрической формы, действуют одновременно напряжения изгиба со стороны абразивного слоя и со стороны основы ленты. При таком сложном напряженном состоянии ленты добиться равномерности распределения контактных давлений возможно лишь подбором соответствующих характеристик инструмента, в первую очередь плотности тканевой основы. Исходя из этого плотность тканевой основы выбрана на спиральных участках 1,5….2 раза большей, чем на прямолинейном. Тем самым осуществляется равномерный прижим ленты к обрабатываемой поверхности в направлении поперечного сечения ленты.

Поскольку абразив наносится непосредственно на тканевую основу, то к ней предъявляются дополнительные требования, а именно наряду с высокой прочностью, стойкостью и износостойкостью лента должна обладать достаточной способностью удерживать абразивы, абразивные пасты и суспензии на рабочей поверхности во время обработки. Поэтому тканевая основа состоит из термопластического синтетического волокна и натурального волокна, которые обладают высокой прочностью, стойкостью и износостойкостью и обеспечивает хорошую пространственную структуру для заполнения абразивом. Процентное содержание термопластичного синтетического волокна составляет 70…65 %, а натурального волокна – 30…35 %. Такое соотношение волокон ленты обеспечивает высокие значения прочности ее на разрыв и износостойкости.

При шлифовании и полировании бесконечной лентой изделий сложной геометрической формы (труб, прутков, кулачков, шеек коленчатых валов, различных кольцевых поверхностей, винтовых цилиндрических пружин и др.) важными параметрами процесса шлифования и полирования являются площадь контакта ленты с изделием и фактическое удельное давление в зоне контакта, от которых в значительной степени зависят силы резания и контактные температуры.

Известно, что введение ультразвуковых колебаний в зону резания, особенно при обработке труднообрабатываемых металлов, позволяет повысить производительность процесса, улучшить качество об-

работанной поверхности, значительно снизить силы резания и контактные температуры [2]. При подведении ультразвуковых колебаний к изделию вследствие её геометрической формы на поверхности возникают колебания сложной формы, которые способствуют более равномерной обработке всех участков.

Положительное влияние на процесс шлифования и полирования в условиях охватывающего контакта оказывает также вибрация абразивной ленты в направлении, перпендикулярном скорости резания. В этом случае наряду с уменьшением среднего арифметического отклонения профиля *Ra*, снижается термодинамическая напряжённость процесса обработки, т.е. на поверхности изделия отсутствуют характерные прижоги и трещины.

Учитывая положительное влияние вибраций как абразивной ленты, так и самого изделия на процесс шлифования и полирования, проводили обработку бесконечной шлифовальной лентой с конструктивными данными, указанными выше в условиях охватывающего контакта изделий сложной геометрической формы, а именно корпуса искусственного клапана сердца «ЭМИКС» (рис. 3) и винтовой цилиндрической пружины. Оба изделия имеют отрицательную кривизну в направлении их подачи. Кроме того, корпус клапана имеет участки сопряжений с большим углом подъёма (малую кривизну). Особенность такой обработки состоит в том, что при этом одновременно используются колебательные движения изделия *2* (ультразвуковые колебания частотой 22 кГц) и колебания абразивной ленты *1* (низкочастотные колебания частотой 20…30 Гц). В качестве абразивного материала использовали пасту АСМ 28/20, нанесённую непосредственно на основу ленты. Скорость подачи ленты $\nu_л$ составляла 3,5 м/с, детали $\nu_п$ 0,49 м/мин. Предварительное натяжение ленты составляло 3 Н.

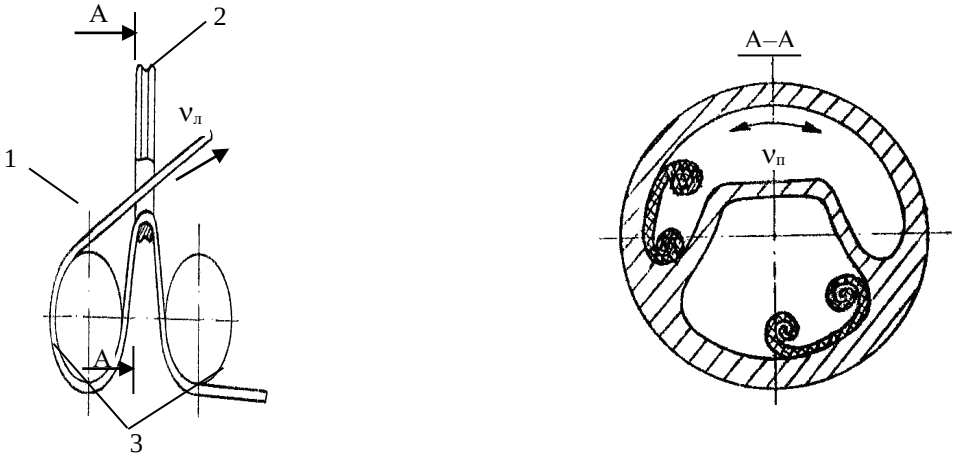

Рис. 3. Схема обработки искусственного клапана сердца

Контроль размеров корпусов искусственного клапана сердца, обработанных лентой, показал, что они находятся в допустимых пределах. На поверхности отсутствуют гофры, характерные для шлифования лентами из однослойной шкурки. Кроме того, стало возможным производить обработку мест сопряжений (криволинейные участки) и тем самым автоматизировать процесс обработки корпуса искусственного клапана сердца. Для обработки сложнофасонных поверхностей изделий в ИТА НАН Беларуси разработано несколько типов станков для ленточного шлифования и полирования спиральных цилиндрических пружин с наложением ультразвуковых колебаний [3, 4].

Возбуждение ультразвуковых колебаний в зоне резания при обработке деталей способствует формированию сжимающих напряжений и снижению силы резания. Поскольку пружина имеет сложную геометрическую форму, то при подведении к ней ультразвуковых колебаний возникают колебания трех видов: продольные, крутильные и изгибные. Так как длина волны каждого вида колебаний различна, то все точки поверхности пружины испытывают сложные колебания и, следовательно, возникает возможность равномерной обработки всей поверхности спиральной цилиндрической пружины.

Отличительной особенностью ленточного шлифования является то, что минимальное натяжение ленты наблюдается в точке входа ее в контакт с обрабатываемой поверхностью, а максимальное – соответствует точке отрыва ленты от обрабатываемой поверхности. Возрастание силы натяжения по длине дуги контакта приводит к тому, что сила притяжения ленты к обрабатываемой поверхности также возрастает от минимального значения в момент входа ленты в контакт до максимального в момент выхода ее из контакта с обрабатываемой поверхностью. Такое изменение силы прижима ленты приводит к тому, что увеличение съёма металла будет происходить в сторону возрастания силы натяжения, т.е. съём металла по сечению витка пружины будет неравномерным. Устранить указанный недостаток можно, если

обработку производить одновременно двумя лентами, движущимися навстречу друг другу. В этом случае съём металла по периметру сечения витка пружины будет равномерным.

Это подтверждают экспериментальные исследования по шлифованию и полированию пружин двумя бесконечными лентами. Обработке подвергали спиральные цилиндрические пружины из стали 65Г следующих размеров: внешний диаметр 30 мм, шаг 8 мм и диаметр сечения витка 4 мм. Линейная скорость абразивной ленты в ходе экспериментов оставались неизменной, равной 6,2 м/с.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что снижение силы трения при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний приводит к увеличению продолжительности работы ленты в 2…3 раза по сравнению с обработкой без наложения ультразвука, время обработки пружины сократилось с 6 до 3 мин, высота неровностей поверхности пружины уменьшилась с Ra = 0,17…0,28 до Ra = 0,09 мкм.

С увеличением интенсивности ультразвуковых колебаний в 2…3 раза время обработки пружины сократилось до 1,5…2 мин, а следовательно производительность процесса шлифования или полирования спиральных пружин возросла в 2…3 раза.

Выводы. Введение ультразвуковых колебаний в зону резания при обработке бесконечной шлифовальной лентой снижает силы резания и контактные температуры, интенсифицирует процесс съёма материала изделий, уменьшает величину среднего арифметического отклонения Ra и средний шаг неровностей профиля. Конструктивное исполнение и структура бесконечной шлифовальной ленты позволяет производить обработку поверхностей изделий, имеющих отрицательную кривизну в направлении подачи изделия, а также мест сопряжений пересекающихся профильных поверхностей (криволинейных поверхностей, имеющих отрицательную кривизну с большими углами подъёма) в направлении подачи инструмента не нарушая при этом исходной геометрии поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Рос. Федерации № 2016748; опубл. 1994.
2. Артемьев, В.В. Ультразвук и обработка материалов / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В.В. Рубаник. – Минск: Экоперспектива, 2003.
3. Станок для ленточного шлифования и полирования кольцевых поверхностей: а.с. 1598373. СССР / В.В. Клубович [и др.]; опубл. // Открытия. Изобрет. – 1998.
4. Станок для ленточного шлифования и полирования спиральных пружин: патент Рос. Федерации. – № 2070505 / В.В. Клубович [и др.]; опубл. 1996.

Поступила 13.01.2010

IMPOSING OF ULTRASONIC VIBRATIONS ABRASIVE PROCESSING OF PRODUCTS OF THE DIFFICULT GEOMETRICAL FORM

V. KLUBOVICH, A. YEREMEYEV, V. LUTSKO

Processing of products of the difficult geometrical form by an infinite abrasive tape with imposing of ultrasonic vibrations is considered. The design of an infinite abrasive tape is offered. It is shown that application of ultrasonic vibrations in polishing products of the difficult geometrical form allow to reduce processing time in 2 times and to increase cleanliness of processing of a surface.