

УДК 536:621.9
DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-33-39

Е.С. Киселёв, д.т.н.
(Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32)
E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок из труднообрабатываемых и композиционных материалов

Приведены результаты исследований возможности интенсификации процессов механической обработки заготовок из труднообрабатываемых и композиционных материалов путём использования энергии маломощного ультразвукового поля.

Ключевые слова: ультразвук; сила резания; жаропрочные и титановые сплавы; композиционные материалы; сложные пакеты; остаточные напряжения.

E.S. Kiselyov, Dr. Sc. Tech.
(Uliyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets, Ulyanovsk, 432027)

Modern ultrasonic dimensional technologies of hard-to-machine and composite material billet machining

There are shown investigation results of possibility for intensification of hard-to-machine and composite material billet machining by means of power use of a low-power ultrasonic field.

Keywords: ultrasound; cutting force; heat-resistant and titanium alloys; composites; complex packs; residual stresses.

Особенностью современного механообрабатывающего производства является необходимость изготовления большого количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей в различных машинах и механизмах, прежде всего в летательных аппаратах (ЛА). Это объясняется, с одной стороны, увеличением их скоростей исполнительного движения и снятием ограничений у конструкторов в создании сложных деталей из-за технологических возможностей использования станков с ЧПУ и обрабатывающих центров с ЧПУ. Кроме того уменьшение конструкторской жесткости, как правило, сопровождается одновременным использованием в качестве конструкционных материалов высокопрочных, а, следовательно, труднообрабатываемых сталей и сплавов для сохранения необходимой прочности при уменьшении сечений изготавливаемых деталей.

В качестве материалов для таких деталей используются труднообрабатываемые коррозионностойкие и жаропрочные стали, а также сплавы на основе титана и никеля. Так, доля титановых и жаропрочных сплавов в конструкции авиационных двигателей четвертого поколения составляла порядка 89 % [1], в двигателях пятого поколения этот процент еще выше.

Одновременно в настоящее время, как в России, так и за рубежом, наблюдается тенденция к увеличению использования композиционных материалов (КМ) в ЛА [2].

Применение КМ является эффективным способом снижения массы конструкции и улучшения летных характеристик, что способствует уменьшению расхода топлива и увеличению полезной нагрузки летательных аппаратов. При этом детали из КМ различных

марок сопрягаются с элементами конструкции из алюминиевых и (или) титановых сплавов, образуя сложные пакеты.

Как правило, из алюминиевых и титановых сплавов изготавливают детали силового каркаса планера и обводообразующие элементы. Количество разнородных материалов в пакетах обычно не превышает трех (титановый сплав, алюминиевый сплав, КМ), а суммарное количество слоев может достигать пяти и более.

Состав сложного пакета и последовательность расположения слоев зависит от конструктивных особенностей и назначения соединяемых деталей. В подавляющем большинстве соединения выполняют путём установки соединительных элементов в предварительно обработанные отверстия. Так как составляющие элементы таких многослойных пакетов обладают различными физико-механическими свойствами (например, низкой теплопроводностью и склонностью к адгезии титановых сплавов, ярко выраженной анизотропией свойств КМ), в процессе их сверления возникают многочисленные дефекты.

Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств при изготовлении нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов, в которых возникающие из-за теплосиловой напряженности и структурно-фазовых превращений остаточные напряжения любого знака способны вызвать значительные изменения в форме и пространственной ориентации, стоит существенно острее, чем для других конструкционных материалов. Это объясняется тем, что их теплопроводность и в 4 – 5 раз меньше, чем у конструкционных углеродистых сталей и вся теплота, возникающая в зоне резания, локализуется в поверхностном слое обрабатываемой заготовки.

На практике это приводит к необходимости существенного уменьшения режимов резания, а в некоторых случаях к необходимости подборки опытным путем последовательности изготовления. Механическую обработку заготовок деталей, обладающих сложной пространственной формой, чаще всего ведут на современных обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы.

Несколько иной состав возникающих проблем при механической обработке заготовок из композиционных материалов, а также сложных пакетов, содержащих детали из КМ: расслоение, деструкция, несрезанные волокна,

вырывы, оплавление полимерной матрицы, изменение формы отверстий, их разбивка, образование прижогов на обработанных поверхностях и т.п. В свою очередь, снижение качества отверстий может привести к высоким контактным нагрузкам, снижению ресурса и разрушению плотности соединений деталей из разнородных материалов в сложных пакетах.

Очевидно, что высокопроизводительный съём припусков с заготовок из любых конструкционных материалов сопровождается высокой теплосиловой напряженностью процесса обработки. Это приводит к возникновению в поверхностном слое заготовок из труднообрабатываемых материалов значительных по величине технологических остаточных напряжений (ТОН), негативное влияние которых на эксплуатационные характеристики изготавливаемых, и прежде всего, нежестких деталей общеизвестны.

При обработке сложных пакетов, включающих КМ, титановые сплавы, помимо ТОН, возможно оплавление полимерной матрицы, расслоение, деструкция композиционных материалов. Поэтому, крайне необходимо найти новые способы снижения теплосиловой напряженности, например, за счет рациональных и экономичных энергетических воздействий.

Существующая тенденция к снижению материалоемкости выпускаемых изделий, возрастающие потребности промышленности в упругих элементах различных устройств обусловили одновременно непрерывный рост объёма производства нежестких корпусных деталей высокой точности. Помимо нежестких деталей, существуют так же жесткие детали, попадающие под определение ГОСТ 30987-2003, состоящие из большого количества сложно сочетаемых нежестких элементов, обработка которых по отдельности вызывает определенные затруднения, а в сочетании с подобными по жесткости элементами делают обработку деталей, в соответствии с требованиями чертежа, крайне трудоёмкой. При этом наиболее трудоёмким процессом является уже не сама механическая обработка, а процесс технологической подготовки производства, а конкретнее проектирование управляющих программ для станков с ЧПУ.

Одной из особенностей современного этапа развития технологии машиностроения является резкое повышение производительности механической обработки заготовок за счёт увеличения скоростей формообразования и почти пропорционального уменьшения сечений среза при управлении современными обрабаты-

вающими центрами с высоконадёжными системами ЧПУ. Для этого необходима коренная модернизация машиностроительного производства с заменой основной части парка металлообрабатывающего оборудования. В то же время, из-за наличия в отечественной промышленности большого количества устаревших металлорежущих станков, наблюдается и противоположная тенденция, заключающаяся в увеличении сечения срезаемого слоя и применения рациональных, относительно невысоких скоростей резания. В обоих случаях дальнейшая интенсификация процессов обработки резанием может быть осуществлена путем внешних энергетических воздействий на объекты контактного взаимодействия в зоне резания для облегчения процесса формообразования новых поверхностей.

Из большого числа видов, форм и схем энергетических воздействий на процесс обработки резанием [3] наиболее простым и экономичным является применение энергии ультразвукового (УЗ) поля. Характерной особенностью современного состояния физики и техники ультразвука является многообразие его применений, охватывающих частотный диапазон от слышимого порога до частот в несколько мегагерц и область мощностей от долей милливатт до десятков киловатт с использованием при механической обработке модуляции колебаний по амплитуде, частоте и фазе [4].

Малая длина УЗ волн обуславливает лучевой характер их распространения, в связи с чем при металлообработке перспективно фокусирование УЗ волн посредством акустических линз, рефлекторов и излучателей вогнутой формы. Это позволяет концентрировать звуковую энергию, получая высокие значения интенсивности звука на поверхностях контактного взаимодействия, которую с помощью традиционных излучателей колебаний получить невозможно. Современные фокусирующие системы позволяют так же формировать заданные характеристики направленности УЗ колебаний и управлять ими.

После многочисленных исследований, выполненных в различных странах, возможность реализации размерной механической обработки с УЗК ограничивалось необходимостью создания специальных приспособлений, установок для наложения энергии ультразвукового поля на заготовку (инструмент, СОЖ, детали станка и технологической оснастки и др.) [3, 4].

В настоящее время компанией DMG MORI разработана и серийно выпускается линейка из 18-ти моделей станков серии ULTRASONIC, в которой в конструкцию шпиндельного узла встроено устройство наложения УЗК на режущий инструмент. Подобными по конструктивному исполнению являются и станки AXILE Machining. Одновременно серийно выпускаются ультразвуковые оправки (компании Altrasonic, CRENO Industry, Pulchertool), применение которых допустимо на обрабатываемых центрах с ЧПУ оснащенными шпинделями с конусом ISO40 (SK40, BT40) [5].

Из основных эффектов и путей использования энергии УЗ поля при механической обработке выделим следующие:

- эффект снижения трения и увеличение пластичности контртел как при параллельном, так и при нормальном направлении колебательных смещений относительно граничных поверхностей;

- УЗ распыление смазочно-охлаждающей жидкости в колеблющемся с УЗ частотой её поверхностном слое или УЗ фонтане на высоких частотах (десятков килогерц в слое, на частотах мегагерцевого диапазона в фонтане);

- капиллярный эффект: аномально глубокое проникновение СОЖ в капилляры и узкие щели под действием ультразвука;

- кавитацию: возникновение в СОЖ массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью;

- УЗ релаксация технологических остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных заготовок.

Последнее, как это следует из дислокационных представлений теории обработки металлических заготовок, объясняется тем, что при воздействии ультразвука на металл, энергия УЗ волны поглощается дислокациями и преобразуется в энергию перемещения этих дислокаций, вызывая развитие внутризерновых деформаций, способствующих пластическим сдвигам, которые и уменьшают остаточные напряжения.

Таким образом, из пяти перечисленных эффектов три связаны с наличием в контактной зоне СОЖ. Один эффект связан с трением и один – с переходом энергии из одного вида в другой. Как следует из результатов исследований, выполненных в Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ), все они весьма чувствительны к модуляции УЗ колебаний по амплитуде и частоте [3, 4].

Следует отметить, что в современных условиях стремление товаропроизводителей к увеличению производительности механической обработки входит в противоречие с все большим ухудшением условий теплообмена в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой, которое обусловлено следующими новыми обстоятельствами.

Во-первых, стремлением к применению СОЖ в ограниченном (дозированном) количестве, вплоть до обработки всухую (изготовление деталей из труднообрабатываемых материалов инструментами из минералокерамики, деталей из композиционных материалов с неметаллической матрицей и др.). В силу того, что СОЖ были и остаются наиболее эффективным средством защиты поверхностных слоёв инструмента и заготовки от деструктивных термомеханических воздействий в зоне обработки, до настоящего времени многие вопросы повышения производительности обработки, обеспечения стойкости режущего инструмента и качества обработанных деталей традиционно решали экстенсивно путём увеличения расхода СОЖ.

Дозированное транспортирование СОЖ в зону резания обусловлено, с одной стороны, значительной долей затрат на её применение в себестоимости продукции машиностроения (до 17 %, что существенно больше затрат на режущий инструмент), а с другой стороны – ужесточением требований к экологической чистоте промышленных производств, так как одним из основных загрязнителей окружающей среды являются именно СОЖ [6].

Второе обстоятельство заключается в увеличении доли нежестких тонкостенных деталей машин с малым объемом основного материала (особенно летательных аппаратов, скоростного железнодорожного, автомобильного и водного транспорта), изготавливаемых из высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами и, одновременно, неблагоприятным с позиции обрабатываемости сочетанием теплофизических характеристик (теплопроводности, теплоёмкости).

Наконец, *третье обстоятельство* состоит в затруднении отвода образующейся теплоты вместе со стружкой как в связи с развитием ресурсосберегающих технологий получения заготовок с максимальным приближением их формы к форме готовых деталей, так и в связи с переориентацией на высокоскоростную обработку, сопряжённую с уменьшением толщины срезаемых слоёв заготовки.

Перечисленные обстоятельства обостряют критический характер теплообмена в контактных зонах при выполнении операций механической обработки в современных условиях и вынуждают искать новые средства снижения теплообразования при обработке заготовок.

В действующем машиностроительном производстве реализация преимуществ от применения СОЖ в ограниченном количестве (а тем более от перехода на обработку всухую) немыслима, если при этом происходит ухудшение качества обработанных поверхностей изготавливаемых деталей или снижение производительности труда и увеличения себестоимости обработки. Поэтому часть функциональных действий дозировано подаваемой СОЖ должна быть реализована за счёт альтернативных технологических решений, а её потенциал должен быть использован максимально. Таким решением является, в частности, УЗ активация элементов технологической системы и СОЖ.

УЗ активация позволяет уменьшить трение в зоне контакта инструмента и заготовки и облегчить диспергирование обрабатываемого материала, являясь, отчасти, альтернативой смазочного и диспергирующего действия СОЖ. Кроме того, ультразвук интенсифицирует охлаждающее и моющее функциональные действия и повышает эффективность транспортирования жидкости в капиллярно-пористое пространство зоны стружкообразования при механической обработке, способствуя более полной реализации потенциала СОЖ.

Рассмотрим изложенные выше положения на некоторых конкретных примерах из практики механической обработки и результатов исследований эффективности энергии мало-мощного (до 100 Вт), в том числе модулированного ультразвукового поля, выполненных в УлГТУ [4].

Оценка эффективности введения энергии УЗ поля в зону сверления сложных пакетов из композиционных материалов в виде двухслойных пакетов, состоящих из листа титанового сплава ВТ-6, (ОСТ 1.90218-76) толщиной H_1 и листа композиционного материала ВКУ-39 (связующее PRISM EP2400 RS; углеродная лента IMS 24K), толщиной H_2 на двух экспериментальных установках, созданных на базе вертикально-сверлильного станка В-1832FN/400 компании PROMA (Чешская республика) и робота КУКА КР-16, оснащенного электрошпинделем с бесступенчатым ре-

гулированием чисел оборотов (до 24 000 об/мин).

В первом случае УЗ колебания наносились через кондукторную втулку, перпендикулярно, во втором – через титановый лист параллельно оси сверла от ультразвукового генератора УЗГ-641А производства НПП «АВИА-СТЕК» мощностью $P_{в} = 0,12$ кВт. При проведении исследований использовали твердосплавные сверла SER 108M Drill диаметром $4,7_{-0,03}$ мм (DIN 6539 Ti-NAMITE-C COATED фирмы SGS), рекомендуемые производителем для сверления заготовок из титановых и алюминиевых сплавов, а также неметаллических материалов.

Составляющие силы резания P_z , P_y , P_x и крутящий момент $M_{кр}$ измеряли с помощью динамометра УДМ-100, оснащенного тензорезисторами Kyowa kfg-5-120-c1-11. Динамометр закреплялся на столе экспериментальной установки. При измерении составляющих силы резания электрический сигнал от тензорезисторов УДМ-100 поступал на усилитель LTR EU-2. Предварительно динамометр калибровали и осуществляли статическую тарировку.

Контроль диаметральных размеров и отклонений в различных слоях детали (компо-

зиционный материал, титановый сплав) производился на станке DMU 50 Premium при помощи измерительного щупа Heidenhain TS649, на различной глубине отверстия по четырем точкам, что позволяло одновременно оценить и отклонения от круглости (рис.1, рис. 2). Оценка площади зон расслоения (деламинации), сколов и разломачивания композиционного материала Skm вычисляли по результатам прямых замеров габаритных размеров данных дефектов на горизонтальном штриховом компараторе «ИЗА-2». Контроль износа сверла по задним поверхностям осуществляли на измерительной машине Walter.

В рамках многофакторного эксперимента исследования проводились следующим образом. На первом этапе исследований контролировали силы резания, диаметральные размеры, отклонения от круглости и износ режущего инструмента (РИ) по задней поверхности в зависимости от составляющих элементов режима резания и углов при вершине сверла 2ϕ .

При проведении второго этапа исследований определяли влияние энергии УЗ поля, способа наложения УЗК и характера модуляции на силы резания, диаметральные размеры, отклонения от круглости и износ РИ по задней поверхности.

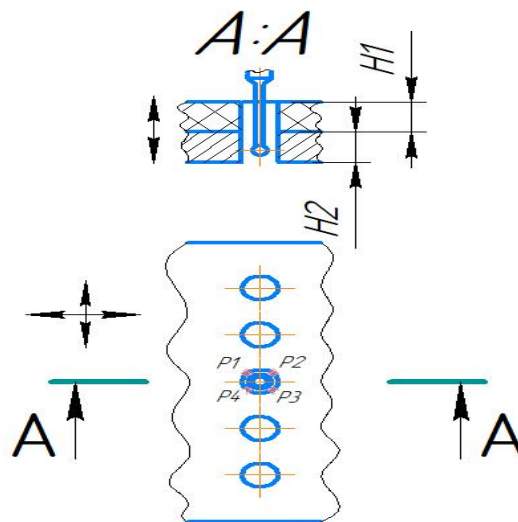


Рис. 1.Схема контроля отверстий на станке DMU 50: H_1 – толщина композиционного материала, мм; H_2 – толщина титанового сплава, мм; P_1 , P_2 , P_3 , P_4 – фактические измеренные позиции

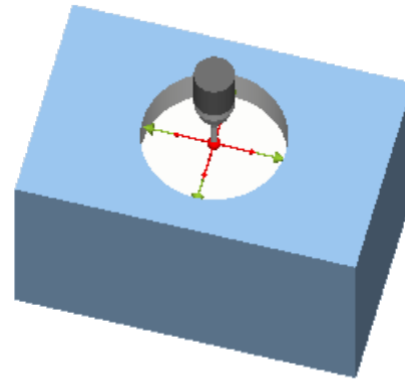
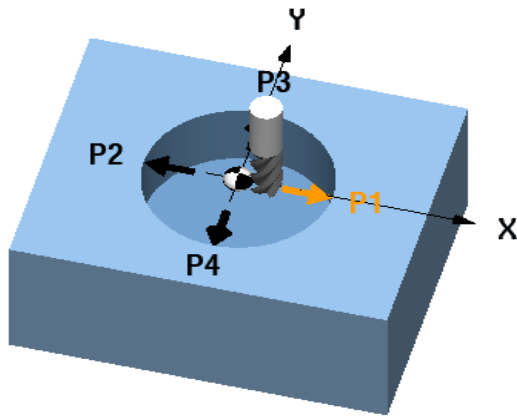
Анализ предварительных результатов исследований убедительно показывает, что введение в зону обработки УЗ колебаний способствует как повышению точности, уменьшению площади зон расслоения и сколов отверстий в готовых деталях, увеличению произво-

дительности и уменьшению расхода режущего инструмента.

В качестве второго примера представлены результаты исследования по оценке эффективности обработки точением заготовок из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР всухую

(обдуг воздухом) резцами из минералокерамики RNGN120400HRSA серии SSY

(Ю.Корея) с введением в зону обработки энергии УЗ поля.



Измерение: отверстие (CYCLE977)

Рис. 2. Визуализация цикла для измерения отверстий: P1, P2, P3, P4 – фактические измеренные позиции

Эксперименты проводили на токарно-винторезном станке QuantumOpti D420x 1000 DPA. В процессе обработки измеряли составляющие силы резания P_z , P_y , P_x и крутящий момент $M_{кр}$ с помощью динамометра УДМ-600, оснащенного тензорезисторами Kuowa kfg-5-120-c1-11. Кроме того, с помощью тепловизора-пирометра TemPro -1200/1600/2200 контролировали температуру на передней поверхности минералокерамической пластины в максимальной близости от зоны контакта с обрабатываемой заготовкой.

Ранее было (в ГК «ХАЛТЕК») установлено, что наибольшая производительность обработки заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе типа Inconel 718 керамическими инструментами SSY (повышение производительности в 30 и более раз, по сравнению с использованием твердосплавного инструмента) достигается при высокоскоростном (свыше 600 м/мин) резании [7]. Последнее объясняется высокими значениями контактной температуры (800...850 °С), что приводит к реализации процесса формообразования новых поверхностей в условиях термопластичности. Это способствует существенному уменьшению сил резания, что и объясняет причины резкого повышения производительности съема припуска.

Очевидно, что этот метод может быть использован только при предварительной (черновой) обработке, так как высокие контактные температуры в зоне резания неизбежно вызовут возникновение дефектного слоя. Как показали результаты опытно-промышленной апробации сотрудниками ГК «ХАЛТЕК» на ПАО «ОДК-САТУРН» глубина дефектного

слоя может достигать 0,5 мм.

Введение в зону формообразования энергии УЗ колебаний, по мнению автора, может изменить характер движения дислокаций и уменьшить величину дефектного слоя. Для проверки этого предположения до и после обработки образцы для исследований подвергались оценке неразрушающим методом структурно-фазовых превращений в поверхностном слое металлов и сплавов на рентгеновском измерительном комплексе «РИКОР-7» и технологических остаточных напряжений I рода на приборе «СИТОН «АРМ».

В первой серии экспериментов осуществляли обработку заготовок без введения в зону формообразования энергии ультразвуковых колебаний, во второй – на режущий инструмент накладывали УЗК от ультразвукового генератора УЗГ-641А производства НПП «АВИАСТЕК» мощностью $P_{вых} = 0,12$ кВт, частотой $f = 22$ кГц и амплитудой $A = 10$ мкм. В обоих случаях использовали элементы режима резания, представленные в табл. 1.

1. Элементы режима токарной обработки заготовок из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР

Режим \ Элемент	t , мм	S , мм/об	v , м/мин	n , об/мин
Черновая обработка	1,5	0,1	600	1740

Анализ основных результатов исследований, убедительно показывает, что введение в зону обработки УЗ колебаний способствует уменьшению составляющих сил резания, а следовательно, и контактной температуры на 12...18 % без снижения производительности

съема припусков с заготовки.

Это подтверждает ранее высказанное предположение о том, что наличие в зоне резания УЗ поля может изменить характер движения дислокаций и уменьшить величину дефектного слоя. Оценка неразрушающим методом структурно-фазовых превращений в поверхностном слое металлов и сплавов на рентгеновском измерительном комплексе «РИКОР-7» и технологических остаточных напряжений I рода на приборе «СИТОН «АРМ» показывают справедливость данной гипотезы: глубина поверхностного слоя уменьшилась в среднем на 50 %, а остаточные напряжения на 10...15 %.

Таким образом, выполненные исследования позволяют утверждать, что введение энергии ультразвукового поля в зону формообразования новых поверхностей заготовок из сложных пакетов композиционных материалов и титановых сплавов, а также жаропрочных сплавов типа Inconel 718 позволяет существенно повысить качество изготавливаемых деталей и производительность обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качан, А.Я. Основные направления развития технологий и металлорежущих станков с ЧПУ / А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой, С.Б. Беликов [и др.] // Вісник двигунобудування. – 2007. – №2. – С. 82-85.
2. Иванов, Ю.Н. Оптимизация технологических параметров сверления отверстий в пакетах из углепластиков и титановых сплавов: дис. канд. техн. наук: 05.02.07 / ИрНИТУ. – Иркутск, 2018. – 141 с.
3. Киселёв, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
4. Киселёв, Е.С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса / Е.С. Киселёв, В.Н. Ковальногов // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2008. – 250 с.

5. ULTRASONIC 20 linear. Flexible integration technologies in DMG machines MORI. ULTRASONIC mobile BLOCK. ULTRASONIC2-th generation [Электронный ресурс] // URL: www.dmgmori.com (дата обращения 10.04.2020)

6. Аскинази, А.Е., Гатовский, М.Б. СОЖ и методы обеспечения экологической безопасности при механической обработке // СТИН. – 1998. № 10. – С. 34 – 39.

7. Храмов, А.В., Горшков, М.Г., Киселев, Е.С. Фрезерная обработка заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе монолитными керамическими фрезами // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №2(42). – С. 219-223.

REFERENCES

1. Kachan, A.Ya. *Basic Trends in Development of Technologies and NC Machine-Tools* / A.Ya. Kachan, V.F. Mozgovoy, S.B. Belikov [et al.] // Bulletin of Motion. – 2007. – No.2. – pp. 82-85.
2. Ivanov, Yu.N. *Technological Parameter Optimization of Hole Drilling in Carbon-Plastic and Titanium Alloy Packages*: thesis for Can. Tech. Degree: 05.02.07 / IrSRTU. – Irkutsk, 2018. – pp. 141.
3. Kiselyov, E.S. *Machining Intensification Using Ultrasonic Field Power*. – Ulyanovsk: UISTU, 2003. – pp. 186.
4. Kiselyov, E.S. Billet machining under conditions of critical heat-mass transfer / E.S. Kiselyov, V.N. Kovalnogov // Proceedings of the Russian School for Problems of Science and Technologies. – M.: RAS, pp. 250.
5. ULTRASONIC 20 linear. Flexible integration technologies in DMG machines MORI. ULTRASONIC mobile BLOCK. ULTRASONIC2-th generation [Electronic Resource] // URL: www.dmgmori.com (address date: 10.04.2020)
6. Askinazy, A.E., Gatovsky, M.B. SS and methods for ecological safety support during machining // STIN. – 1998. No.10. – pp. 34-39.
7. Khramov, A.V., Gorshkov, M.G., Kiselyov, E.S. Heat-resistant nickel-based billet milling with monolithic ceramic milling cutters // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. No.2 (42). – pp. 219-223.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко

