



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Особенности применения ультразвука при плазменно-механической обработке деталей из труднообрабатываемых материалов

Вагиф Аббасов^a, Расим Баширов^{b, *}

Азербайджанский технический университет, пр. Гусейн Джавида, 25, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4633-6728>,  abbasov49@aztu.edu.az, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6907-2502>,  rasim_agma@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 06 апреля 2022

Рецензирование: 19 апреля 2022

Принята к печати: 27 июня 2022

Доступно онлайн: 15 сентября 2022

Ключевые слова:

Труднообрабатываемые материалы

Плазматродержатель

Коэффициент обрабатываемости

Ультразвуковой резец

Устройства для ультразвукового точения

Плазменно-механическая обработка

Плазменно-ультразвуковая обработка

Износ резца

Колебательная деформация стружки

АННОТАЦИЯ

Введение. Конструкционные материалы, в том числе материалы из жаропрочных и труднообрабатываемых сталей, широко применяются в различных отраслях машиностроения. Для повышения эффективности изготовления деталей термического оборудования из жаропрочных и труднообрабатываемых сталей применяется технологический метод резания с предварительным плазменным подогревом заготовки. Существует также технологический метод резания металлов, в том числе труднообрабатываемых ультразвуковым точением. Исходя из этого для повышения эффективности плазменной механической обработки труднообрабатываемых материалов необходимо исследовать технологические возможности применения ультразвукового точения при плазменной механической обработке. **Цель работы:** исследовать износ режущих инструментов при применении ультразвука в условиях плазменно-механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. **В работе исследованы:** особенности процесса плазменно-механической обработки в условиях ультразвукового резания и определены величины износа твердосплавных резцов ВК8, Т5К10 и Т15К6 при обработке сталей марок 20Х13Н18 и 20Х25Н20С2Л, а также определены износ указанных резцов в условиях обычного точения этих же материалов для сопоставления результатов износа резцов в различных условиях обработки. Методом исследования является определение линейного износа твердосплавных резцов по задней поверхности при обычной, плазменно-механической и плазменно-механической обработке с применением ультразвукового резания. Линейный износ резцов был измерен инструментальным микроскопом и визуально обследован лупой с десятикратным увеличением. **Результаты и обсуждение.** В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по определению износа режущих инструментов при обработке жаропрочных сталей марки 20Х13Н18 и 20Х25Н20С2Л твердосплавными резцами марки ВК8, Т5К10 и Т15К6. Проводились исследования по определению износа твердосплавных резцов как при обычном механическом резании, плазменно-механическом резании, а также плазменно-механическом резании с применением ультразвука. Эксперименты проводились при точении указанных материалов на модернизированном токарном станке мод. 1А64. К токарному станку подключен выпрямитель с управляемым дросселем и плазматрон мод. АПР-403, на суппорте станка размещен плазмодержатель. В качестве источника питания сжатой электрической дуги служит полупроводниковый выпрямитель. Электронная дуга горит между катодом (плазматроном) и анодом (заготовкой) в точке плазмообразующего газа, сжатый воздух проходит через канал сопла плазмотрона. При проведении экспериментов положение плазмотрона регулировалось по отношению оси вращения детали. При проведении опытов по изучению износа резцов в условиях ультразвукового плазменно-механического резания ультразвук подавался на режущую кромку с помощью устройства, разработанного авторами. При обработке жаропрочных сталей в обычных условиях точения режимы обработки были следующими: скорость резания $V = 10$ м/мин, глубина резания $t = 3...4$ мм, продольная подача $S_{пр} = 0,31$ мм/об. Установлено, что при обработке сталей марки 20Х13Н18 при таких условиях задняя поверхность твердосплавного резца Т5К10 изнашивается до величины 1 мм в течение 10 мин, а твердосплавного резца ВК8 – в течение 15 мин. При плазменной механической обработке в 2 раза увеличены скорость резания и величина подачи, при этом Т5К10 изнашивается до 1 мм в течение 20 мин, ВК8 – 25 мин. Плазменно-механическая обработка с применением ультразвука показала, что твердосплавный резец Т5К10 за 50 мин резания изнашивается на величину 0,50 мм, а ВК8 – 0,35 мм. Такие же результаты получены при обработке жаропрочной стали 20Х25Н20С2Л. Таким образом, исследование износа твердосплавных резцов при обработке жаропрочных сталей показали, что использование ультразвукового резания при плазменно-механической обработке сталей может значительно снизить величину износа инструмента. Представленные результаты подтверждают перспективность применения ультразвукового плазменно-механического резания жаропрочных сталей лезвийными инструментами.

Для цитирования: Аббасов В.А., Баширов Р.Дж. Особенности применения ультразвука при плазменно-механической обработке деталей из труднообрабатываемых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 53–65. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-53-65.

*Адрес для переписки

Баширов Расим Джавад оглы, д.т.н., профессор

Азербайджанский технический университет,

пр. Гусейн Джавида, 25,

AZ 1073, г. Баку, Азербайджан

Тел.: +994 (50) 212 22 73, e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az

Введение

В машиностроении широко применяются различные труднообрабатываемые материалы для изготовления деталей и конструктивных элементов оборудования электрохимического, химического и других производств. Применение труднообрабатываемых и жаропрочных сталей для изготовления термического оборудования затруднено тем, что эти материалы плохо подвергаются механическому резанию лезвийными инструментами. В связи с этим на производстве электротермического оборудования делаются попытки повышения эффективности обработки жаропрочных и труднообрабатываемых материалов путем применения различных комбинированных методов снятия стружки, одним из которых является резание с плазменным нагревом заготовки перед обработкой. Обработка резанием жаропрочных сталей с плазменным нагревом представляет собой комбинированный процесс, при котором механическая энергия вместе с энергией низкотемпературной плазмы используется для увеличения производительности обработки и снижения расхода режущего инструмента при резании этих материалов.

Существуют различные методы плазменного нагрева заготовки в процессе механической обработки [1–6]. В этих и других работах приводятся данные о производительности плазменно-механического точения, фрезерования и т.д. Установлено, что плазменный нагрев улучшает обрабатываемость материалов в тех случаях резания, когда увеличение стойкости инструмента вследствие снижения удельной работы резания больше, чем отрицательное воздействие повышенных температур на увеличение интенсивности явлений схватывания и износа инструмента. Как известно, износ режущего инструмента является интегрированным процессом, сопровождаемым сложными и взаимовлияющими явлениями в местах контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой, протекающими в условиях высоких температур и давлений. Поэтому рекомендуют использовать режущие инструменты с внутренним охлаждением при плазменно-механической обработке.

Анализ [7–20] научно-исследовательских работ показал, что вопросу определения взаимосвязи между износом режущего инструмента

и параметрами процесса плазменно-механической обработки труднообрабатываемых материалов уделено недостаточное внимание. Кроме того, среди имеющихся научно-исследовательских работ отсутствуют работы, посвященные применению ультразвуковых колебаний при комбинации плазменно-механической обработки труднообрабатываемых материалов. Поэтому были поставлены задачи исследовать процесс и износ режущего инструмента при ультразвуковой плазменно-механической обработке труднообрабатываемых материалов.

Труднообрабатываемые материалы обладают целым рядом таких специфических физико-химико-механических свойств, как высокая прочность, жаропрочность, жаростойкость, вязкость, коррозионно-стойкость, тугоплавкость и т.д. Труднообрабатываемые материалы имеют сложную карбидообразующую структуру.

Одним из труднообрабатываемых материалов являются жаропрочные стали и сплавы, которые по своему основному составу подразделяются на жаропрочные стали на основе железа, никеля, кобальта и титана. Эти стали и сплавы часто применяются в производстве деталей электротермического оборудования.

Жаропрочные стали на основе железа, никеля, кобальта и титана трудно поддаются обычному резанию лезвийным инструментом, т.е. точению, фрезерованию, в связи с рядом специфических особенностей, в частности:

- зависимостью повышения упрочнения жаропрочных сталей в процессе деформации при резании от строения кристаллической решетки этих материалов, которая определяет число возможных направлений скольжения при пластической деформации в процессе резания. Например, кристаллы сталей ферритно-перлитной группы имеют решетку объемно-центрированного куба с восемью возможными направлениями скольжения, кристаллы сталей аустенитного класса – форму гранецентрированного куба с девятнадцатью возможными направлениями скольжения [1];

- высокой пластичностью жаропрочных сталей, благодаря которой при их точении наблюдается повышение микротвердости в зоне образования стружки, что усложняет процесс разделения материалов на передней поверхности режущего лезвия;

- низкой теплопроводностью жаропрочных сталей, которая приводит к повышению температуры на контактных поверхностях при резании, вызывающее рост интенсивности явлений адгезии и диффузии и, как следствие, разрушение режущей части инструмента;

- способностью этих материалов сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах, возникающих в зоне деформации и схода стружки при резании, что приводит к весьма высокому удельному давлению в месте контакта материала с инструментом в процессе резания;

- повышенной истирающей способностью этих сталей, обусловленной наличием в них, кроме фазы твердого раствора, так называемой второй фазы, образующей интерметаллидные или карбидные включения, которые приводят к повышению износа инструмента при обработке;

- малой виброустойчивостью при движении резания, обусловленной высокой упрочняемостью этих материалов при неравномерности протекания процесса их пластического деформирования.

Указанные выше и иные проблемы, связанные со специфическими характеристиками жаропрочных сталей, требуют создания новых технологических решений, позволяющих улучшить обрабатываемость этих материалов.

Методика исследований

Одним из методов улучшения обрабатываемости жаропрочных сталей и сплавов является плазменно-механическая обработка. При плазменно-механической обработке жаропрочных сталей лезвийным инструментом нагрев заготовки осуществляется плазменной дугой. Нагрев заготовки из жаропрочных сталей улучшает обрабатываемость лезвийным инструментом этих материалов. Использование в процессе резания предварительного нагрева позволяет увеличивать разницу между контактной твердостью инструмента и твердостью обрабатываемого материала, что приводит к увеличению стойкости лезвийного инструмента. При предварительном нагреве заготовок из жаропрочных материалов при механическом резании лезвийным инструментом происходит большее разупрочнение обрабатываемого материала, чем

разупрочнение рабочих поверхностей режущего инструмента.

Проведенные эксперименты показали, что при плазменной механической обработке высокая концентрация тепла в небольшом объеме позволяет хорошо управлять процессом нагрева, добиваясь достаточной стабильности; наиболее целесообразно применять плазменный нагрев при резании труднообрабатываемых материалов, имеющих низкий коэффициент обрабатываемости. Установлено, что эффективность процесса плазменного нагрева тем выше, чем ниже коэффициент обрабатываемости жаропрочных материалов; следует отметить, что при плазменно-механической обработке для эффективного резания металла необходимо прогревать слой заготовки на глубину резания и величину подачи до оптимальной температуры резания, которая складывается из температуры предварительного нагрева и температуры, возникающей вследствие стружкообразования. Следовательно, режим плазменного нагрева следует определять в зависимости от состава и физико-механических параметров обрабатываемого жаропрочного материала [3, 4, 6–8].

При плазменно-механической обработке увеличение температуры нагрева заготовки изменяет физико-химические и механические свойства не только обрабатываемого материала, но и материала инструмента. Установлено [1–5], что при повышении температуры нагрева поверхности трения, с одной стороны, увеличивается пластичность обрабатываемого материала, с другой – возрастает степень пластической деформации стружки. Локальный нагрев поверхностных слоев обрабатываемого материала, происходящий при соприкосновении с плазменной дугой, вызывает в заготовке температурное поле высокой степени неравномерности, что приводит к появлению крайне неравномерных полей напряжений в обрабатываемом металле. Неравномерность полей напряжений усиливается структурными превращениями, возникающими в части объема нагретого металла, и расплавлением отдельных его участков. Такой механизм воздействия плазменной дуги может привести к микроразрывам и другим нарушениям сплошности в поверхностном слое заготовки и содействовать облегчению деформации стружкообразования при токарной и фрезерной обработке.

Решающее влияние на характер и интенсивность износа инструмента оказывает соотношение между твердостью материалов заготовки и инструмента в условиях плазменного нагрева. Это соотношение названо коэффициентом устойчивости формы. Проведенные эксперименты позволили установить, что при плазменно-механической обработке жаропрочных материалов устойчивость формы инструментов из твердого сплава значительно выше, чем у других инструментальных материалов. Поэтому эксперименты проводились резцами, оснащенными пластинками из твердых сплавов марок Т15К6, Т5К10, ВК8.

Для проведения экспериментов по точению была создана установка на базе токарно-винторезного станка мод. 1А64, на котором размеры обрабатываемой заготовки позволяют исследовать обрабатываемость всех типов цилиндрических деталей, применяемых в производстве электротермического оборудования.

Установка состоит из токарно-винторезного станка, источника питания АПР-403 УХЛЧ-2, держателя плазмотрона, непосредственно плазмотрона, воздухопровода для подвода к плазмотрону. Держатель плазмотрона устанавливается на резцедержателе и закрывается кожухом. От источника питания электропроводом ток подведен к детали через токосъемное устройство шпинделя станка. Обрабатываемая заготовка устанавливается в четырехкулачковом патроне и фиксируется задним центром. На резцедержателе установлен резец для ультразвукового точения и резки металлов. Резец для ультразвукового резания закрепляется на резцедержателе станка, образует первую ступень ультразвукового ступенчатого концентратора механических колебаний с пьезоэлектрическим датчиком, установленным на торцевом сечении его свободного конца [5, 6, 9, 10].

Ультразвуковой резец 1 (рис. 1) содержит цилиндрический и конический концентратор 2 и пьезоэлектрический излучатель 3, жестко зажатые отражателем 4 через сквозное отверстие 5 и прижимной болт 6 к свободному концу сечения режущего инструмента, которые образуют вторую ступень ультразвукового ступенчатого концентратора механических колебаний. Плюсовые электроды 7 пьезоэлектрического датчика соединены с входом усилителя 8 напряжения и

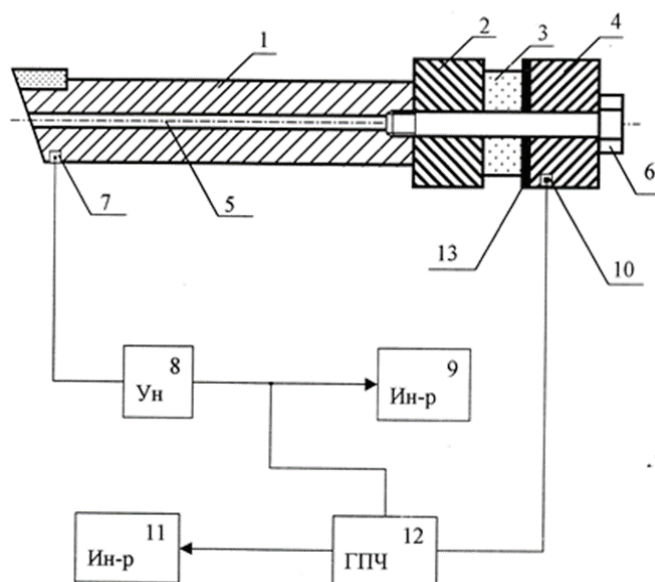


Рис. 1. Устройство для ультразвукового точения и резки металлов

Fig. 1. Device for ultrasonic turning and cutting of metals

индикатором, электроды 10 пьезоэлектрического излучателя соединены с выходом генератора 12 переменной частоты и индикатором 11, выход усилителя напряжения соединен с управляющим входом генератора переменной частоты.

Один из электродов пьезоэлектрического излучателя электрически изолирован от контактирующей поверхности отражателей прокладкой 13 из диэлектрического материала. Таким образом, устройство для ультразвуковой обработки материалов содержит ступенчатый концентратор ультразвуковых колебаний с переменным профилем, рабочий конец которого выполняет функцию резца, и пьезоэлектрический излучатель в форме шайбы, зажатый между концентратором и отражателем.

Работа устройства ультразвукового резания осуществляется следующим образом. В процессе плазменно-механической обработки жаропрочных сталей и сплавов вначале переменное напряжение с выхода генератора 12 с частотой, равной собственной частоте пьезоэлектрического излучателя 3, подводится к его плюсовым электродам 10. Это приводит к возбуждению и появлению на поверхности пьезоэлектрического излучателя (других стоячих волн) ультразвуковых механических колебаний.

Механические колебания передаются во вторую ступень 2 концентратора, затем, усиливаясь,

механические колебания ультразвуковой частоты передаются в первую ступень, концентрируются непосредственно на режущем инструменте 1 устройства. Обрабатываемая деталь закрепляется на шпинделе и осуществляется обработка, при этом режимные параметры скорость и сила резания измеряются с помощью пьезоэлектрического датчика 7, который формирует на поверхности своих электродов электрический сигнал. Этот сигнал подается на вход усилителя напряжения 8, с выхода которого подается на вход индикатора устройства, преобразующего аналоговый сигнал в цифровой код.

Особенности процесса плазменно-механической обработки изучали в условиях ультразвукового резания при точении сталей марок 20Х23Н18 и 20Х25Н20С2Л (см. таблицу).

Наружный диаметр заготовок был равен 170...196 мм, длина – 1500...1800 мм. Заготовки устанавливали в 4-кулачковом патроне с упором

в торец патрона и прижимали задним центром. Обработку вели по корке и по обработанной поверхности. Вначале включали дежурную дугу и после автоматического перехода ее на основную дугу включали продольную подачу и протачивали цилиндрический участок длиной 20...30 мм на глубину 7...10 мм. Устанавливали плазмотрон так, чтобы минимальное расстояние от поверхности резания до сопла плазмотрона при максимальном биении составляло 5...10 мм. Максимальное расстояние от плазмотрона до заготовки принималось в пределах $L = 30...40$ мм. Угловое положение плазмотрона регулировалось в процессе резания с целью оптимального нагрева поверхности резания на заготовке.

Режимы работы плазменного нагрева, в частности питания, в процессе экспериментов варьировали в следующих пределах: рабочее напряжение источника питания $U = 150...200$ В, рабочий ток $I = 250...300$ А.

Химический состав обрабатываемых материалов (согласно ГОСТ 5632–72)

Chemical composition of work materials (according to GOST 5632–72)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni
20Х23Н18	≤ 0,20	≤ 1,0	≤ 2,0	22...25	17...20
20Х25Н20С2Л	≤ 0,20	2-3	≤ 1,5	24...27	18...21

Проведенные исследования показали, что рациональный интервал нагрева срезаемого слоя поверхности заготовки из жаропрочной стали 20Х23Н8 в условиях плазменного механического резания должен быть в пределах 700...750 °С, при обработке стали 20Х25Н20С2Л должен нагреваться в пределах 800...820 °С.

Давление сжатого воздуха, подаваемого источником питания в плазмотрон, регулировали в пределах 0,15...0,20 МПа. Охлаждение плазмотрона осуществлялось водопроводной технической водой с последующим сливом в канализацию.

Режимы ультразвукового точения на режущую кромку инструмента подаются ультразвуковые колебания, частота которых меняется в пределах 18...22 кГц, амплитуда колебаний варьировалась от 2 до 15 мкм.

При проведении экспериментов установлено, что выбор диаметра отверстия сопла плазмотрона для нагрева поверхности заготовки во време-

ни, образования стружки является одним из важных параметров процесса плазменного нагрева.

Для определения режимов процесса стабильного плазменного нагрева заготовки в условиях обработки рассчитываются технологические параметры, такие как напряжение питания, сила тока, расстояние от сопла до зоны резания, давление сжатого воздуха и др.

Поэтому были испытаны сопла с диаметром отверстия, равным 4, 5, 6, 7, 8 и 9 мм. Эксперименты показали, что при использовании сопла с диаметром 7 мм значительно улучшаются условия нагрева заготовки, обеспечивающие устойчивый факел пламени и лучший отвод продуктов горения от рабочей зоны.

Эксперименты проводились с использованием токарных резцов как с напаянными, так и неплетачиваемыми пластинками. Геометрические параметры режущей части инструментов были: $\gamma = 5...10^\circ$; $\alpha = 8...12^\circ$; $\lambda = 10...15^\circ$; $\phi = 15...20^\circ$ и радиус вершины режущей кромки $r = 1,5$ мм.

Для сопоставления результатов исследований точения жаропрочных сталей проводились как плазменно-механическое резание, так и резание с применением ультразвуковой плазменной механической обработки.

Для сопоставления результатов плазменно-и плазменно-ультразвукового резания также были проведены эксперименты без применения плазменного нагрева и ультразвукового резания, которые показали, что при выборе геометрической формы пластинки нужно предусмотреть фаску на передней поверхности резца, равную величине продольной подачи, вследствие чего происходит упрочнение режущего клина инструмента [9–11]. При этом для достижения соответствующей прочности режущей кромки величина заднего угла α была взята несколько меньше.

Токарная обработка без применения плазменного нагрева велась по заводским технологическим режимам, например: при скорости резания $V = 10$ м/мин ($n = 160$ об/мин), глубине резания $t = 3 \dots 4$ мм, продольной подаче $S_{пр} = 0,8$ мм/об.

При проведении экспериментов по определению износа режущего инструмента в условиях обычного резания использовали умеренные режимы, где глубина резания находилась в пределах $t = 3$ мм, продольная подача $S_{пр} = 0,31$ мм/об. При резании сталей 20X23H18 и 20X25H20C2Л на скоростях до 10 м/мин износ твердосплавных пластин остается в пределах допустимого. Поэтому при обычном резании жаропрочных сталей применяются указанные режимы. Проведенными экспериментами установлено, что при плазменно-механической обработке с целью увеличения эффективности нагрева обработку следует проводить при увеличении глубины резания до $t = 6$ мм [12–16].

В работе также был исследован износ пластин из твердого сплава T15K6 при точении жаропрочных сталей марки 20X23H18 и 20X25H20C2Л в различных условиях обработки. Выявлено, что износ пластин из T15K6 по сравнению с износом пластин из T5K10 при точении указанных материалов значительно больше, поэтому в дальнейших исследованиях не применяли резцы, оснащенные пластинками из сплава T15K6.

На рис. 2 представлены результаты исследования износа твердосплавных резцов T5K10 и BK8, где кривые 1-1' отражают динамику износа при обычных условиях резания: $V = 10$ м/мин; $t = 3$ мм; $S_{пр} = 0,31$ мм/об; 2-2' – при плазменно-механической обработке: $V = 20$ м/мин; $t = 6$ мм; $S_{пр} = 0,31$ мм/об; $I = 250$ А; $U = 150$ В; 3-3' – при плазменно-ультразвуковой обработке: $V = 20$ м/мин, $t = 6$ мм; $S_{пр} = 0,31$ мм/об; $I = 250$ А; $U = 150$ В; $f = 18$ кГц; $A = 4$ мкм; 1, 2, 3 – при обработке резцами из твердого сплава марки T5K10; 1', 2', 3' – при обработке резцами из твердого сплава марки BK8.

Износ резцов при обычном режиме механической обработки исследован при $V = 10$ м/мин, $S_{пр} = 0,31$ мм/об. При повышении режимов резания от указанной величины режущий инструмент в течение 2-3 мин теряет режущую способность. Плазменно-механическая обработка и плазменно-механическая обработка с применением ультразвука проводились в одном режиме механического резания.

При обработке жаропрочной стали марки 20X23H18 в различных условиях резания установлено, что твердосплавные пластины из T5K10 по сравнению с BK8 во всех видах обработки изнашиваются по задней поверхности быстрее. Выявлено, что при точении стали 20X23H18 как однокарбидные твердосплавные резцы, так и двухкарбидные при обычном

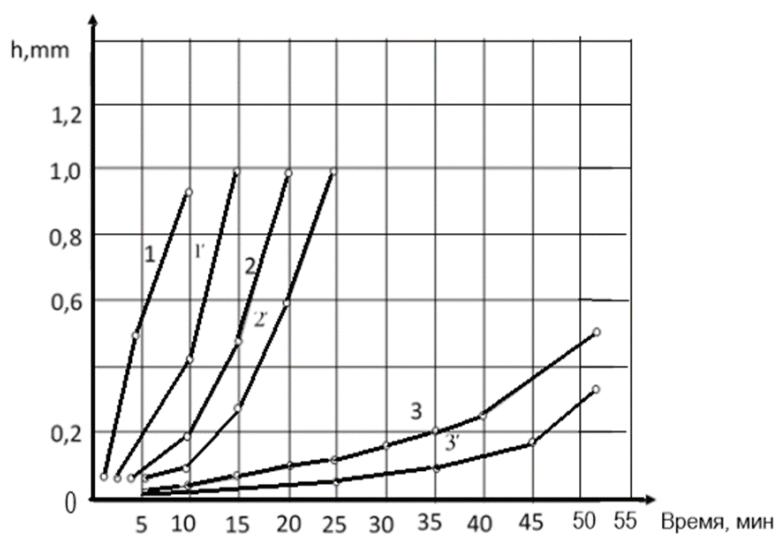


Рис. 2. Износ по задней поверхности резцов при различных условиях обработки по корке стали 20X23H18

Fig. 2. Wear on the back surface of the cutter under various processing conditions when turning steel 20Cr13Ni18 slag

методе точения изнашиваются значительно больше, чем при других методах обработки [16–20].

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов позволил выяснить, что при плазменно-механическом точении стали 20X13H18, несмотря на то что глубина резания в 2 раза больше (кривые 2, 2', рис. 2), чем при обычном точении, (кривые 1, 1', рис. 2), износ задней поверхности проходного резца в зависимости от скорости резания в 1,5–2 раз меньше. А при плазменно-механической обработке с применением ультразвука износ резцов (кривые 3, 3', рис. 2) по сравнению с износом резцов при обычном резании (кривые 1, 1') в 5–10 раз меньше. Например, при обычном точении жаропрочных сталей 20X23H18 резцом, оснащенным твердосплавной пластиной Т5К10 в течение 5 мин резания износ резца колеблется в пределах 0,5...0,6 мм (кривые 1, рис. 2), а при обработке той же стали плазменно-механическим резанием с применением ультразвука износ резца, оснащенного пластиной из твердого сплава Т5К10, до 0,4 мм достигается в течение 52 мин, что свидетельствует об уменьшении износа резца в 10 раз.

В текущем исследовании для построения каждой точки было проведено по пять экспериментов.

Эксперименты показали, что как при обычном методе, так и при плазменно-механической обработке по корке, резцы, оснащенные однокарбидными твердосплавными пластинками ВК8, обладают рядом преимуществ по сравнению с резцами, оснащенными двухкарбидными твердосплавными резцами. В частности, исследования показали, что характер износа задней поверхности режущей кромки пластинки из твердого сплава ВК8 более равномерный, интенсивность и скорость изнашивания замедлены, катастрофических разрушений не наблюдается, что благоприятно влияет на процесс точения сталей. При обработке жаропрочных сталей твердосплавными пластинками Т5К10 износ задней поверхности режущей кромки резца неравномерный, наблюдаются следы выкрашивания и образование канавки износа, что приводит к быстрой потере его режущей способности.

Исследования показали, что наиболее благоприятные условия возникают при точении жаропрочных сталей плазменно-ультразвуковой обработкой как при использовании однокарбидных, так и двухкарбидных пластин (кривые 3, 3', рис. 2).

Результаты экспериментов показали, что при обычном методе точения стали 20X13H18 максимальный износ резцов наблюдается через 10...15 мин обработки, а при плазменно-механической обработке максимальный износ резцов наблюдается через 25 мин точения.

Установлено, что в процессе плазменно-ультразвуковой обработки максимальный износ резцов ($h = 1,0$ мм) достигается через 90 мин.

Это связано с тем, что при применении ультразвука в условиях плазменно-механической обработки жаропрочных сталей формирование стружки в контактной зоне происходит под воздействием ультразвуковых колебаний режущей кромкой резца.

Режущая кромка резца получает как в продольном, так и в радиальном направлении ультразвуковые колебания с частотой 18 кГц и амплитудой около $A = 4$ мкм, приводящие к дополнительной деформации стружки при ее сходе, что фактически нивелирует контакт стружки с режущей кромкой.

При этом наличие ультразвуковых колебаний улучшает условия скольжения и схода стружки в зоне ее образования, что позволяет значительно уменьшить трение стружки о контактные поверхности резца.

На рис. 3 показаны кривые, полученные при обработке жаропрочной стали марки 20X25H20C2Л, где 1, 1' – при обычном резании: $t = 3$ мм, $S_{\text{пр}} = 0,31$ мм/об; 2, 2' – при плазменно-механической обработке: $t = 6$ мм, $S_{\text{пр}} = 0,31$ мм/об, $I = 250$ А, $U = 150$ В; 3, 3' – при плазменно-ультразвуковой обработке: $t = 6$ мм, $S_{\text{пр}} = 0,31$ мм/об, $I = 250$ А, $U = 150$ В, $f = 18$ кГц, $A = 4$ мкм; 1, 2, 3 – при обработке пластинами из твердого сплава марки Т5К10; 1', 2', 3' – при обработке пластинами из твердого сплава марки ВК8.

В зависимости от времени обработки износ режущего инструмента по задней поверхности изменяется аналогично рис. 2. Другими словами, при обработке указанного выше материала обычным резанием износ резца значи-

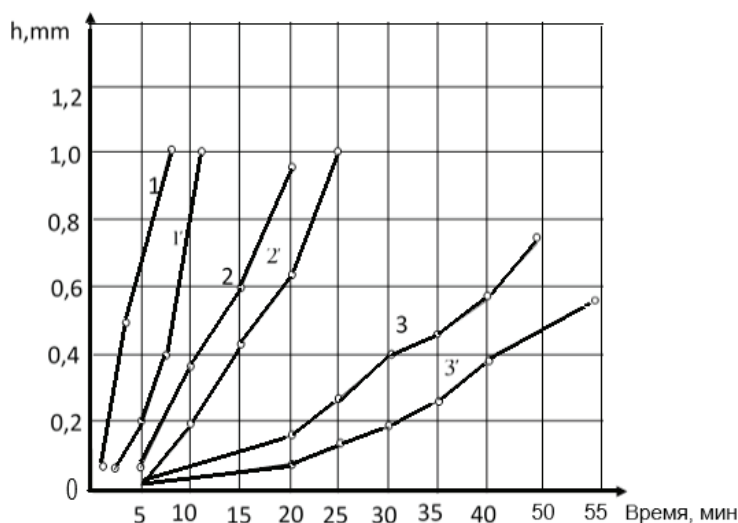


Рис. 3. Износ по задней поверхности при различных условиях обработки по корке стали 20Х25Н20С2Л

Fig. 3. Wear on the end flank of the cutter under various processing conditions when turning steel 20Cr25Ni20Si2(cast) slag

тельно больше при плазменно-механической и плазменно-ультразвуковой обработке. Анализ графиков 1, 1' на рис. 2 и на рис. 3 показывает, что, как и при обработке жаропрочных сталей твердосплавными резцами марки Т5К10 и ВК8, наибольший износ резцов наблюдается при точении стали 20Х25Н20С2Л. Исследованиями установлено, что при обработке жаропрочных сталей марки 20Х25Н20С2Л при всех методах обработки линейный износ инструмента и его интенсивность намного выше, чем при обработке стали 20Х23Н18. Полученные результаты объясняются тем, что жаропрочная сталь марки 20Х25Н20С2Л по сравнению со сталью 20Х23Н18 содержит больше таких легирующих элементов, как хром (на 2 %), никель (на 2 %), а также кремний, что приводит к образованию большого количества карбидов.

Большой объем карбидов в сталях вызывает повышение интенсивности износа режущего инструмента при механической обработке, в том числе при плазменно-механической и плазменно-ультразвуковой обработке.

Кривые, представленные на рис. 2 и 3, позволили выяснить, что при плазменно-механической обработке жаропрочных сталей интенсивность изнашивания материала инструментов снижается по сравнению с обычным методом резания. При этом стойкость инструментов увеличивается примерно

в 1,8–2,5 раза по сравнению с обычным методом обработки.

Исследования показали, что при обычном методе точения жаропрочных сталей на контактных поверхностях режущего лезвия постоянно в процессе резания наблюдаются высокие удельные нагрузки и температура, что создает неблагоприятные условия для работы режущего инструмента. Кроме того, жаропрочные стали имеют склонность к адгезионному схватыванию с материалом инструмента и обладают высокой прочностью, что при резании приводит к значительным наклонам при пластическом деформировании контактной зоны и к повышению интенсивности износа режущего лезвия при обычном резании.

При обработке жаропрочных сталей с плазменным нагревом благодаря предварительному подогреву снижаются нагрузки, действующие на переднюю поверхность инструмента. Контактное давление на заднюю поверхность режущего лезвия существенно уменьшается по сравнению с давлением при резании обычным методом, т.е. без предварительного подогрева. Поэтому при обработке материалов резанием с плазменным нагревом улучшается условие работы инструмента, снижается вероятность пластического деформирования режущей кромки резца.

Проведенные эксперименты показали (рис. 2 и 3), что при обработке плазменно-ультразвуковым резанием жаропрочных сталей стойкость режущего инструмента как в случае пластин из твердого сплава марки ВК8, так и из твердого сплава марки Т5К10, увеличивается по сравнению плазменным методом обработки в 4–5 раз, а по сравнению с обычным механическим резанием (без плазменного нагрева) – в 10–12 раз. Это связано с кинематической особенностью процесса ультразвукового резания и источника ультразвуковых колебаний.

При обработке жаропрочных сталей для ультразвукового резания использовали инструменты, в конструкциях которых был использован концентратор механических колебаний, изготовленный из титанового сплава марки ВТ-1. Применение титанового сплава в качестве материала для концентратора ультразвуковых колебаний позволяет значительно уменьшать потери часто-

ты в процессе передачи колебаний к режущей кромке и снижает температуру нагрева корпуса резца. Это связано с тем, что титановые сплавы обладают достаточно большой механической прочностью и низким волновым сопротивлением, а также малым коэффициентом поглощения звука.

Эксперименты показали, что при использовании ультразвуковых колебаний в процессе токарной обработки жаропрочных сталей в условиях плазменного нагрева стойкость режущего инструмента увеличивается за счет вибрации режущей кромки инструмента. Это явление позволяет улучшить стружкообразование в контактной зоне обработки. При точении ультразвуковые волны колеблют режущую кромку пластины примерно 18 000 раз за одну минуту (18 кГц), что создает дополнительную деформацию стружки, а наличие ультразвуковых колебаний перемещает вершину режущей кромки инструмента как в радиальном, так и в продольном направлении. Поэтому в этих условиях образование стружки коренным образом отличается от обычного метода резания металлов, а именно при ультразвуковом точении передача инструменту ультразвуковых колебаний существенно уменьшает сдвиговые деформации в зоне резания, также в зоне сдвига стружки происходит образование множества микротрещин. Кроме этого наличие высокочастотных колебаний в режущей кромке инструмента предотвращает образование нароста на его поверхности, острота режущего клина в контактной зоне сохраняется, что снижает трение стружки по передней поверхности, таким образом, снижается сила резания и нагрев режущего инструмента.

Следует отметить, что изменением параметров ультразвуковых колебаний можно управлять процессом стружкообразования таким образом, чтобы режущая кромка инструмента могла сохранять свою геометрическую форму, благодаря чему изменяется место касания стружки при выходе из зоны резания.

Например, при увеличении амплитуды ультразвуковых колебаний в контактной зоне увеличивается циклическое воздействие ультразвуковых колебаний на обрабатываемую поверхность, приводящее к росту усталостной прочности поверхности. Кроме того, при ультразвуковом резании металлов благодаря ультразвуковым колеба-

ниям увеличивается кинематический передний угол инструмента, что приводит к улучшению условий внедрения режущего клина резца в обрабатываемый материал и поэтому снижается динамика обрабатываемости материалов.

Таким образом, на основании комплексных исследований сделаны следующие выводы.

1. Применение ультразвука при плазменно-механической обработке жаропрочных сталей позволяет многократно (до 10 раз) уменьшить износ твердосплавных пластин токарных резцов.

2. Установлено, что при обычном механическом резании стали 20X13H18 износ твердосплавных резцов Т5К10 по сравнению с резцами из ВК8 в 1,5–2 раза больше.

При точении жаропрочных сталей 20X13H18 и 20X25H20C2Л как при обычном методе, так и при плазменно-механическом с применением ультразвука износ однокристаллического твердого сплава ВК8 значительно меньше, чем при обработке двухкристаллическим твердым сплавом Т5К10.

Список литературы

1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
2. Подураев В.Н., Соколов Н.М. Плазменно-фрезерная обработка крупных сварных узлов из высокопрочных сталей // Станки и инструмент. – 1989. – № 7. – С. 23–28.
3. Резников А.Н., Черторижский Ю.Н., Мурин И.А. Определение режима плазменно-механической обработки // Станки и инструмент. – 1990. – № 1. – С. 30–31.
4. Михалькова С.А. Плазменно-механическая обработка деталей металлургического оборудования // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 53–56.
5. Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. Обработка труднообрабатываемых материалов резанием. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 208 с. – ISBN 978-5-6040281-0-0.
6. Патент № I 2003.0014 Азербайджанская Республика. Устройства для ультразвукового резания и растачивания металлов / Аббасов В.А., Баширов Р.Д. – 2003.
7. Баширов Р.Д., Аббасов В.А. Выбор параметров пьезоэлементов и расчетов токарного резца-концентратора для ультразвукового точения // Механика – машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 42–45.
8. Баширов Р.Д., Аббасов В.А. Устройства для ультразвукового точения и резки металлов // 48-я учебно-методическая научно-техническая конфе-

ренция профессорско-преподавательского состава и аспирантов АзТУ. – Баку, 2001. – Ч. 2. – С. 79–81.

9. Регулирование газодинамических параметров сжатой дуги на выходе двухкамерного плазматрона / Ю.Д. Щицын, И.Б. Фомин, Н.Н. Струков, Д.С. Белинин, П.С. Кучев // Сварка и диагностика. – 2011. – № 6. – С. 14–16.

10. *Ablyaz T.R., Belinin D.S.* Wire electrical discharge machining of items after plasmatic surface hardening // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2014. – Vol. 19, N 8. – P. 1096–1098. – DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.19.8.21041.

11. *Чурюмов А.Ю., Поздняков А.В.* Горячая пластическая деформация и микроструктура жаропрочной нержавеющей стали 20Х18Н23 // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сборник тезисов докладов XXV Уральского школы металловедов-термистов (Екатеринбург, 3–7 февраля 2020 г.). – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 185–187.

12. *Тарасов С.С., Коряжский А.А.* Повышение эффективности токарной обработки деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов керамическим инструментом // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 11. – С. 14–19.

13. *Волков Д.И., Проскуряков С.Л., Тарасов С.С.* Применение высокоскоростной токарной обработки для изготовления деталей из жаропрочных никелевых сплавов керамическим инструментом // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. – 2012. – № 2. – С. 134–137.

14. *Волков Д.И., Тарасов С.С.* Расчетное определение параметров сечения среза при высокоскоростной токарной обработке криволинейных поверхностей деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. – 2013. – № 1. – С. 61–68.

15. *Коряжский А.А., Тарасов С.С.* Повышение эффективности процесса токарной обработки криволинейных поверхностей деталей из жаропрочных сплавов керамическим инструментом // СТИИ. – 2013. – № 8. – С. 23–27.

16. *Leppert T.* Surface layer properties of AISI 316L steel when turning under dry and with minimum quantity lubrication conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B: Journal of Engineering Manufacture. – 2012. – Vol. 226, iss. 4. – P. 617–631. – DOI: 10.1177/0954405411429894.

17. *Bushlya V., Zhou J., Ståhl J.E.* Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 3. – P. 370–375. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.064.

18. Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions / H. Attia, S. Tavakoli, R. Vargas, V. Thomson // Procedia CIRP. – 2010. – Vol. 59. – P. 83–88. – DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.093.

19. Effect of low-frequency vibration on workpiece in EDM processes / G.S. Prihandana, M. Mahardika, M. Hamdi, K. Mitsui // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2011. – Vol. 25, no. 5. – P. 1231–1234. – DOI: 10.1007/s12206-011-0307-1.

20. *Kötter D.* Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen. These / Universität Dortmund. – Vulkan-Verlag, 2006. – 107 S. – ISBN 3802787366. – ISBN 978-3802787362.

21. *Тахман С.И.* Разработка единых моделей процесса изнашивания инструментальных твердых сплавов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 56–59.

22. *Astakhov V.P., Davim P.J.* Tools (geometry and material) and tool wear // Machining / ed. by P.J. Davim. – London: Springer, 2008. – P. 29–57. – DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science





Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Features of ultrasound application in plasma-mechanical processing of parts made of hard-to-process materials

Vagif Abbasov^a, Rasim Bashirov^{b, *}

Department of Machine Building, Azerbaijan Technical University, 25 H. Cavid avenue, Baku, AZ 1073, Azerbaijan

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4633-6728>,  abbasov49@aztu.edu.az, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6907-2502>,  rasim_agma@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 April 2022

Revised: 19 April 2022

Accepted: 27 June 2022

Available online: 15 September 2022

Keywords:

Hard-to-process materials

Plasmatron holder

Machinability coefficient

Ultrasonic Cutter

Ultrasonic turning device

Plasma-mechanical processing

Plasma-ultrasonic treatment

Cutter wear

Vibrational deformation of the chip.

ABSTRACT

Introduction. Structural materials, including materials made of heat-resistant and hard-to-work steels, are widely used in various branches of mechanical engineering. To increase the efficiency of manufacturing parts of thermal equipment from heat-resistant and hard-to-work steels, the technological method of cutting with preliminary plasma heating of the workpiece is used. There is also a technological method of cutting metals, including hard-to-process materials by ultrasonic turning. Proceeding from this, in order to increase the efficiency of plasma machining of hard-to-process materials, it is necessary to investigate the technological possibilities of using ultrasonic turning of hard-to-process materials during plasma machining. **The purpose of the work:** to investigate the wear of cutting tools when using ultrasound in the conditions of plasma-mechanical processing of parts made of hard-to-process materials. **The paper investigates** the features of the plasma-mechanical processing under ultrasonic cutting conditions and **determines** the wear values of carbide cutters VK8, T5K10 and T15K6 when processing steels of grades 20Cr13Ni18 and 20Cr25Ni20Si2(cast). And also the wear of these cutters was determined under the conditions of conventional turning of the same materials to compare the results of wear of the cutters in different processing conditions. **The research method** is to determine the linear wear of carbide cutters along the back surface with conventional, plasma-mechanical and plasma-mechanical cutting assisted with ultrasonic cutting using an instrumental microscope and visual estimation with a 10x magnifying glass. **Results and discussion.** The paper presents the results of experimental studies to determine the wear of cutting tools when processing heat-resistant steels of the 20Cr13Ni18 and 20Cr25Ni20Si2(cast) grades with carbide cutters of the VK8, T5K10 and T15K6 grades. Studies were carried out to determine the wear of carbide cutters as with conventional mechanical cutting, plasma-mechanical cutting, as well as plasma-mechanical cutting using ultrasound. The experiments were carried out when turning these materials on a modernized lathe mod.1A64. A rectifier with a controlled choke and a plasma torch mod.APR-403 are connected to the lathe; a plasma holder is placed on the lathe carriage. A semiconductor rectifier serves as a power source with a compressed electric arc of current. The arcing takes place between the cathode (plasma torch) and the anode (blank) at the point of the plasma-forming gas; compressed air passes through the nozzle channel of the plasma torch. During the experiments, the position of the plasma torch was adjusted relative to the part rotation axis. When conducting experiments on studying the wear of cutters under conditions of ultrasonic plasma-mechanical cutting, ultrasound was applied to the cutting edge using a device developed by the authors. When processing heat-resistant steels under the usual turning condition, processing modes were adopted: cutting speed $V = 10$ m/min, cutting depth $t = 3..4$ mm, longitudinal feed $S_f = 0.31$ mm/rev. It is found that when processing steel grade 20Cr13Ni18 by conventional cutting, the back surface of the carbide cutter made of T5K10 wears out to 1 mm in size within 10 minutes, and for the cutter made of VK8 – within 15 minutes. During plasma machining, the cutting speed and the feed rate were increased 2 times; the results of the wear of the cutters show that at the same time T5K10 wears out to 1 mm within 20 minutes, VK8 – within 25 minutes. Plasma-mechanical processing using ultrasound show that the carbide cutter T5K10 wears out by 0.50 mm in less than 50 minutes of cutting, and VK8 wears out by 0.35 mm. The same results are obtained when processing heat-resistant steel 20Cr25Ni20Si2(cast). Thus, the study of wear of carbide cutters in the processing of heat-resistant steels shows that the use of ultrasonic cutting in plasma-mechanical processing of steels can significantly reduce the amount of tool wear. The presented results confirm the prospects of using ultrasonic plasma-mechanical cutting of heat-resistant steels with blade tools.

For citation: Abbasov V.A., Bashirov R.J. Features of ultrasound application in plasma-mechanical processing of parts made of hard-to-process materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-53-65. (In Russian).

* Corresponding author

Bashirov Rasim J., D.Sc. (Engineering), Professor

Department of Machine Building,

Azerbaijan Technical University,

AZ 1073, 25 H. Cavid avenue, Baku, Azerbaijan

Tel: +994 (50) 212 22 73, e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az

References

1. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting hard-to-cut materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974. 587 p.
2. Poduraev V.N., Sokolov N.M. Plazmenno-frezernaya obrabotka krupnykh svarnykh uzlov iz vysokoprochnykh staley [Plasma-milling processing of large welded assemblies from high-strength steels]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1989, no. 7, pp. 23–28. (In Russian).
3. Reznikov A.N., Chertorizhskii Yu.N., Murin I.A. Opredelenie rezhima plazmenno-mekhanicheskoi obrabotki [Determination of the mode of plasma-mechanical treatment]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1990, no. 1, pp. 30–31. (In Russian).
4. Mikhail'kova S.A. Plazmenno-mekhanicheskaya obrabotka detalei metallurgicheskogo oborudovaniya [Plasma-mechanical processing of parts of metallurgical equipment]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1989, no. 5, pp. 53–56. (In Russian).
5. Maslov A.R., Skhirtladze A.G. *Obrabotka trudnoobrabatyvaemykh materialov rezaniem* [Processing of hard-to-cut materials by cutting]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 208 p. ISBN 978-5-6040281-0-0.
6. Abbasov V.A., Bashirov R.D. *Ustroistva dlya ul'trazvukovogo rezaniya i rastachivaniya metallov* [Devices for ultrasonic cutting and boring of metals]. Patent AZ, no. I 2003.0014, 2003.
7. Bashirov R.D., Abbasov V.A. Vybor parametrov p'ezoelementov i raschetov tokarnogo reztsa-konsentratora dlya ul'trazvukovogo tocheniya [Choice of parameters of piezoelectric elements and calculations of a turning tool-concentrator for ultrasonic turning]. *Mekhanika – mashinostroenie = Mechanics – Machine Building*, 2001, no. 1, pp. 42–45. (In Russian).
8. Bashirov R.D., Abbasov V.A. [Devices for ultrasonic turning and cutting of metals]. *48-ya uchebno-metodicheskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava i aspirantov AzTU* [Proceedings of the 48th educational and methodological scientific and technical conference of the faculty and postgraduate students of AzTU]. Baku, 2001, pt. 2, pp. 79–81.
9. Shchitsyn Yu.D., Fomin I.B., Strukov N.N., Belinin D.S., Kuchev P.S. Regulirovanie gazodinamicheskikh parametrov szhati dugi na vykhode dvukhkamernogo plazmotrona [Regulation of the gas-dynamic parameters of the compressed arc at the output of a two-chamber plasma torch]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2011, no. 6, pp. 14–16.
10. Ablyaz T.R., Belinin D.S. Wire electrical discharge machining of items after plasmatic surface hardening. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, vol. 19, no. 8, pp. 1096–1098. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.19.8.21041.
11. Churyumov A.Yu., Pozdnyakov A.V. [Hot deformation behavior and microstructure of the stainless heatresistant steel AISI 310]. *Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov: sbornik tezisov dokladov XXV Ural'skoi shkoly metallovedov-termistov* [Proceedings of the XXV Ural School of Thermal Metallurgists “Actual Problems of Physical Metallurgy of Steels and Alloys”], Ekaterinburg, 2020, pp. 185–187. (In Russian).
12. Tarasov S.S., Koryazhkin A.A. Povyshenie effektivnosti tokarnoi obrabotki detalei GTD iz zharoprochnykh nikelovykh splavov keramicheskim instrumentom [Improving the efficiency of turning of the gte heat-resistant nickel alloys, ceramic tool]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*, 2012, no. 11, pp. 14–19.
13. Volkov D.I., Proskuryakov S.L., Tarasov S.S. Primenenie vysokoskorostnoi tokarnoi obrabotki dlya izgotovleniya detalei iz zharoprochnykh nikelovykh splavov keramicheskim instrumentom [Application of high-speed turning for high-temperature alloys details manufacturing by instruments with cutting ceramics in conditions of high pressured lubricant coolant feeding]. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*, 2012, no. 2, pp. 134–137. (In Russian).
14. Volkov D.I., Tarasov S.S. Raschetnoe opredelenie parametrov secheniya sreza pri vysokoskorostnoi tokarnoi obrabotke krivolineinykh poverkhnostei detalei GTD iz zharoprochnykh nikelovykh splavov [Estimated calculation of cut section parameters at high-speed turning processing of curvilinear surfaces of gte details made of heat resisting nickel alloys]. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*, 2013, no. 1, pp. 61–68. (In Russian).
15. Koryazhkin A.A., Tarasov S.S. Povyshenie effektivnosti protsessa tokarnoi obrabotki krivolineinykh poverkhnostei detalei iz zharoprochnykh splavov keramicheskim instrumentom [Improving the efficiency of the process of turning curvilinear surfaces of parts from heat-resistant alloys with ceramic tools]. *STIN = Machines and Tooling*, 2013, no. 8, pp. 23–27.

16. Leppert T. Surface layer properties of AISI 316L steel when turning under dry and with minimum quantity lubrication conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, vol. 226, iss. 4, pp. 617–631. DOI: 10.1177/0954405411429894.

17. Bushlya V., Zhou J., Ståhl J.E. Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 3, pp. 370–375. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.064.

18. Attia H., Tavakoli S., Vargas R., Thomson V. Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions. *Procedia CIRP*, 2010, vol. 59, pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.093.

19. Prihandana G.S., Mahardika M., Hamdi M., Mitsui K. Effect of low-frequency vibration on workpiece in EDM processes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, vol. 25, no. 5, pp. 1231–1234. DOI: 10.1007/s12206-011-0307-1.

20. Kötter D. *Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen*. These. Universität Dortmund. Vulkan-Verlag, 2006. 107 S. ISBN 3802787366. ISBN 978-3802787362.

21. Takhman S.I. Razrabotka edinykh modelei protsessa iznashivaniya instrumental'nykh tverdykh splavov [Development of unified models of the instrumental hard alloys wear-out process]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2008, no. 9, pp. 56–59.

22. Astakhov V.P., Davim P.J. Tools (geometry and material) and tool wear. *Machining*. Ed. by P.J. Davim. London, Springer, 2008, pp. 29–57. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_2.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).